

007  
178

ПРОБЛЕМЫ



БИОНИКИ

ВЫПУСК

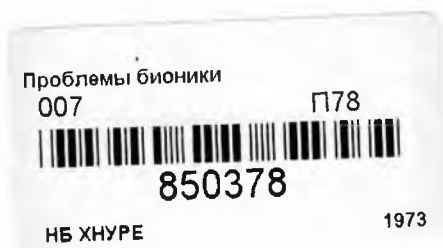
10

РЕСПУБЛИКАНСКИЙ  
МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
СБОРНИК

---

# ПРОБЛЕМЫ БИОНИКИ

ВЫПУСК 10



ИЗДАТЕЛЬСТВО  
ХАРЬКОВСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА имени А. М. ГОРЬКОГО  
Х а р ь к о в 1 9 7 3

Сборник посвящен математическому моделированию преобразования информации в процессе психической деятельности человека.

Рассматриваются математические модели, описывающие функциональные свойства зрения, слуха, вкуса, вибрационной чувствительности кожи человека, технические аналоги математических моделей, проблемы переработки словесной информации, распознавания зрительных образов, восприятия и нормализации зрительных картин. Исследуются законы функционирования нейронов с помощью моделей нейроноподобных структур на дискретных и аналоговых элементах, вопросы моделирования поведения человека, биоэлектрического управления, проблема разработки вычислительных систем для реализации моделей функционирования зрительного аппарата.

Сборник предназначен для научных работников, аспирантов, инженеров, работающих в области кибернетики, бионики, вычислительной техники и инженерной психологии.

Редакционная коллегия:

чл. корр. АН СССР Б. С. Сотсков] (отв. редактор), чл.-корр. АМН СССР *Н. М. Амосов*, проф. *Ю. П. Шабанов-Кушнарченко* (зам. отв. редактора), проф. *А. А. Волков*, доц. *Е. П. Путьгин*, канд. биол. наук *К. А. Ивансв-Муромский*, канд. техн. наук *М. Ф. Бондаренко* (отв. секретарь), доц. *В. А. Грабина*, канд. техн. наук *В. А. Ловицкий*.

Адрес редакционной коллегии: Харьков, ГСП-218, пр. Ленина, 14, Институт радиоэлектроники.

Ответственный за выпуск *И. Г. Новожилова*.

2102—035 226—73  
М226(04)—73

ХАРЬКОВСКАЯ КНИЖНАЯ ФАБРИКА «КОММУНИСТ»

## О СТРУКТУРНОЙ СЛОЖНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ФОРМАЛЬНЫХ НЕЙРОНОВ НА МАГНИТНЫХ ТОКОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯХ

**В. И. Потапов, П. В. Миренков**

Формальные нейроны (ФН) могут использоваться как монофункциональные и многофункциональные элементы систем автоматики и вычислительной техники [1—3]. В настоящее время известно большое количество различных типов дискретных ФН, имеющих одинаковые логические возможности и отличающихся видом пресинаптического взаимодействия, а также типом волокон [3]. Из этого многообразия наибольший практический интерес, по-видимому, представляют однородные ФН следующих типов: с запрещающими волокнами (ФНЗ), с разрешающими (ФНР), с объединяющимися (ФНО) и с комбинацией спонтанных и запрещающих волокон (ФНСЗ).

У ФНЗ узлы взаимодействия волокон реализуют функции вида

$$y_j = \alpha_{ij} x_i \bigwedge_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^{\delta} \beta_{lj} x_l \quad (1)$$

$$(j = 1, 2, \dots, m; \quad i = 1, 2, \dots, \delta),$$

где  $i$  и  $l$  — номера функциональных входов ФНЗ, связанных соответственно запрещаемыми (возбуждающими и тормозящими) и запрещающими волокнами;  $\alpha_{ij}$  и  $\beta_{lj}$  — коэффициенты соответствующих двоичных матриц  $\| \alpha_{ij} \|$  и  $\| \beta_{lj} \|$  ( $i, l = 1, 2, \dots, \delta; j = 1, 2, \dots, m$ ) указанных связей функциональных входов ФНЗ с волокнами.

Сами ФНЗ описываются выражением

$$f(x_1, \dots, x_\delta) = \text{Sg} \left[ \sum_{i=1}^{\delta} \sum_{j=1}^m \alpha_{ij} k_j x_i \left( 1 - \bigvee_{l=1}^{\delta} \beta_{lj} x_l \right) - \Theta \right], \quad (2)$$

где функция  $f = \text{Sg}Z$  определяется как

$$\text{Sg}Z = \begin{cases} 1, & \text{если } Z \geq 0, \\ 0, & \text{если } Z < 0; \end{cases}$$

$\Theta$  — порог срабатывания нейрона, а остальные обозначения соответствуют введенным в работе [2].

ФНР в отличие от ФНЗ имеют разрешающие волокна вместо запрещающих. Функция разрешающего волокна противоположна функции запрещающего, т. е. в возбужденном состоянии оно пропускает сигнал по несущему (возбуждающему или тормозящему) волокну, а в невозбужденном — блокирует его. Таким образом, в подобных нейронах узлы взаимодействия волокон реализуют функции вида

$$y_i = \alpha_{ij} x_i \bigwedge_{l=1}^{\delta} \varepsilon_{lj} x_l \quad (3)$$

$$(j = 1, 2, \dots, m; \quad i = 1, 2, \dots, n),$$

а сами ФНР функционируют согласно выражению

$$f(x_1, \dots, x_n) = Sg \left[ \sum_{l=1}^{\delta} \sum_{j=1}^m \alpha_{lj} k_j x_l (1 - \bigvee_{l=1}^{\delta} \varepsilon_{lj} x_l) - \Theta \right], \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{lj}$  — равные единице коэффициенты двоичной матрицы  $\|\varepsilon_{lj}\|$  ( $l = 1, \dots, \delta; j = 1, \dots, m$ ) связи  $l$ -х функциональных входов ФНР с  $j$ -ми синапсами посредством разрешающих волокон.

У ФНО волокна от различных функциональных входов могут объединяться на одном синапсе. Такие узлы взаимодействия волокон реализуют функции

$$y_j = \bigvee_{l=1}^{\delta} \gamma_{lj} x_l \quad (j = 1, 2, \dots, m), \quad (5)$$

а сами ФНО могут быть описаны аналитическим выражением вида

$$f(x_1, \dots, x_n) = Sg \left[ \sum_{j=1}^m k_j \left( \sum_{i=1}^{\delta} \alpha_{ij} x_i + \bigvee_{l=1}^{\delta} \gamma_{lj} x_l \right) - \Theta \right], \quad (6)$$

где  $\alpha_{ij}^*$  и  $\gamma_{lj}$  — равные единице коэффициенты соответствующих двоичных матриц  $\|\alpha_{ij}^*\|$  и  $\|\gamma_{lj}\|$  непосредственной связи  $i$ -х функциональных входов ФНО с  $j$ -ми синапсами и связи посредством объединяющихся волокон  $l$ -х функциональных входов ФНО с  $j$ -ми синапсами.

У ФНСЗ спонтанные волокна все время возбуждены и блокируются лишь в моменты возбуждения соединенных с ними и с функциональными входами нейрона запрещающих волокон. У ФНСЗ узлы взаимодействия спонтанных и запрещающих волокон реализуют функции вида

$$y_j = \bigwedge_{i=1}^{\delta} \beta_{ij} x_i \quad (j = 1, 2, \dots, m), \quad (7)$$

а сами ФНСЗ описываются соотношением

$$f(x_1, \dots, x_n) = Sg \left[ \sum_{j=1}^m k_j (1 - \bigvee_{i=1}^{\delta} \beta_{ij} x_i) - \Theta \right], \quad (8)$$

где  $\beta_{ij}$  имеет тот же смысл, что и  $\beta_{lj}$  в (2).

Аналитические выражения (2), (4), (6), (8) справедливы для описания монофункциональных ФН (т. е. нейронов с постоянными весовыми коэффициентами  $k_j$  входов порогового элемента нейрона и постоянным порогом  $\Theta$ ) и многофункциональных ФН, логическая гибкость которых достигается за счет множества  $\{k_j\}_p$  переменных весовых коэффициентов входов и переменного порога  $\Theta$ .

Таким образом, техническая реализация монофункциональных ФН сводится к построению взаимосвязанных логических элементов, реализующих функции соответствующих узлов взаимодействия (1), (3), (5) или (7), и порогового элемента с постоянными весовыми коэффициентами входов и постоянным порогом. У пороговых элементов многофункциональных ФН должна быть предусмотрена возможность ступенчатого изменения весовых коэффициентов входов и порога с шагом  $\pm 1$ .

Определим верхнюю границу структурной сложности рассматриваемых типов ФН путем количественной оценки следующих конструктивных параметров:  $M$  — количество всех видов входных волокон у ФН;  $M_n$  — количество синапсов порогового элемента ФН;  $|k|$  — модуль значения весового коэффициента синапса;  $S$  — количество различных значений весовых коэффициентов у одного ФН;  $H$  — количество узлов взаимодействия (схем запрета, разрешения, объединения) по числу запрещаемых, разрешаемых и объединенных одной сборкой входных волокон;  $H^*$  — количество парных взаимодействий волокон;  $|\Theta|$  — модуль значения порога срабатывания ФН;  $N$  — число различных порогов  $\Theta$  у многофункционального ФН в активном диапазоне;  $R$  — количество различных наборов  $\{k_j\}_p$  весовых коэффициентов у многофункциональных ФН.

Будем полагать, что синтез всех типов ФН осуществляется по методу [3, 4], обеспечивающему минимизацию числа входных волокон с заданной конфигурацией. При этом в общем случае перечисленные выше конструктивные параметры зависят от числа входов  $\delta$  и типа ФН, а также от реализуемой функции  $f(x_1, \dots, x_\delta)$  для монофункциональных ФН или от реализуемого нейроном множества функций  $\{f_i(x_1, \dots, x_\delta)\}$  для многофункциональных ФН.

Проведенный анализ общей конструктивной сложности рассматриваемых типов ФН, синтезируемых по методу [3, 4], позволил получить для произвольного  $\delta$  следующие оценочные формулы, которые с целью сокращения приводятся без доказательства.

### 1. Монофункциональные ФН ( $R = N = 1$ ):

ФНЗ, ФНР, ФНО

$$M(\delta) \leq \sum_{n=1}^{\delta} n C_{\delta}^n = \delta 2^{\delta-1}; \quad (9)$$

$$M_n(\delta) \leq \sum_{n=1}^{\delta} C_{\delta}^n = 2^{\delta} - 1; \quad (10)$$

$$|k(\delta)| \leq \frac{2^{\delta}}{2} = 2^{\delta-1} \quad (11)$$

при  $|\Theta| = 1$ ;

$$|k(\delta)| \leq \sum_{n=2^{\delta-1}}^{2^{\delta}-1} n - \sum_{n=1}^{2^{\delta-1}-1} n = 2^{2(\delta-1)} \quad (12)$$

при  $1 < |\Theta| \leq 2^{\delta} - 1$

в последнем случае возможна минимизация  $H(\delta)$  и  $H^*(\delta)$  у ФН по сравнению с предыдущим вариантом (11);

$$S(\delta) \leq M_n(\delta) = 2^{\delta} - 1; \quad (13)$$

$$H(\delta) \leq \sum_{n=2}^{\delta} C_{\delta}^n = 2^{\delta} - (\delta + 1); \quad (14)$$

$$H^*(\delta) \leq \sum_{n=1}^{\delta} n C_{\delta}^{n+1} = 1 + (\delta - 2) 2^{\delta-1}; \quad (15)$$

$$|\Theta(\delta)| \leq 2^{\delta} - 1. \quad (16)$$

#### ФНСЗ

У нейронов данного типа максимально возможные значения параметров  $M_n(\delta)$ ,  $|k(\delta)|$ ,  $S(\delta)$  и  $|\Theta(\delta)|$  рассчитываются соответственно по формулам (10) — (13), (16), а оценочные выражения  $M(\delta)$ ,  $H(\delta)$ ,  $H^*(\delta)$  имеют вид

$$M(\delta) \leq \sum_{n=1}^{\delta} (n+1) C_{\delta}^n = (2+\delta) 2^{\delta-1} - 1; \quad (17)$$

$$H(\delta) \leq \sum_{n=1}^{\delta} C_{\delta}^n = 2^{\delta} - 1; \quad (18)$$

$$H^*(\delta) \leq \sum_{n=1}^{\delta} n C_{\delta}^n = \delta 2^{\delta-1}. \quad (19)$$

## 2. Многофункциональные ФН:

а) ФНЗ, ФНР, ФНО, ФНСЗ с постоянными весовыми коэффициентами входов ( $R=1$ ) и переменным порогом  $\Theta_v$ , ( $v=1, 2, \dots, N$ ). Для рассматриваемых типов многофункциональных нейронов максимальные значения конструктивных параметров  $M(\delta)$ ,  $M_n(\delta)$ ,  $|k(\delta)|$ ,  $S(\delta)$ ,  $H(\delta)$ ,  $H^*(\delta)$  и  $|\Theta(\delta)|$  рассчитываются по соответствующим формулам (9) — (19), а параметр  $N(\delta)$  оценивается выражением

$$N(\delta) \leq 2^{\delta} - 1. \quad (20)$$

Каждый такой нейрон с  $\delta$  функциональными входами за счет дискретного изменения порога  $\Theta_v$  может реализовать  $2^{\delta} - 1$

различных информационно-значимых функций из множества  $[F^R]$ , которые для  $\Theta_v > \Theta_{v+\varphi}$  ( $\varphi = 1, 2, \dots$ ) удовлетворяют условию  $f_i = f_{i+\varphi}$ ;

б) ФНЗ, ФНР, ФНО, ФНСЗ с постоянным порогом ( $\Theta = \text{const}$ ,  $N = 1$ ) и переменными весовыми коэффициентами  $\{k_j\}_R$  ( $\varphi = 1, 2, \dots, R$ ). Максимальные значения конструктивных параметров указанных типов нейронов рассчитываются по тем же формулам, что и подобные параметры многофункциональных ФН в пункте а), за исключением параметра  $|k(\delta)|$ , который при  $\Theta = 1$  определяется по (11).

Всякий подобный ФН с  $\delta$  функциональными входами может реализовать максимально  $2^{2^\delta - 1}$  различных функций  $f_i(x_1, \dots, x_\delta)$  при условии, что в каждой из них отсутствует обязательно одна и та же любая из  $2^\delta$  конstituента единицы. Нарушение этого условия приводит к сокращению множества функций, реализуемых одним ФН с постоянным порогом и переменными весовыми коэффициентами.

Из сказанного очевидно, что количество различных наборов весовых коэффициентов у многофункциональных ФН с постоянным порогом не должно превышать

$$R(\delta) \leq \sum_{n=1}^{\delta-1} C_{\delta-1}^n = 2^{2^\delta - 1}; \quad (21)$$

в) ФНЗ, ФНР, ФНО, ФНСЗ с переменным порогом  $\Theta_v$ , ( $v = 1, 2, \dots, N$ ) и переменными весовыми коэффициентами  $\{k_j\}_R$  ( $\varphi = 1, 2, \dots, R$ ). Рассматриваемые нейроны так же структурно сложны, как и предыдущие, но их функциональные возможности значительно шире. Один ФН с  $\delta$  функциональными входами может реализовать все  $2^{2^\delta}$  функций. Максимальная логическая гибкость ФН достигается, например, при  $R(\delta) = 2^{2^\delta}$  и  $N(\delta) = 2$ , ( $\Theta_1 = +1$ ,  $\Theta_2 = -1$ ) или при других значениях  $R(\delta)$  и  $N(\delta)$ . Однако во всех случаях  $R(\delta) < 2^{2^\delta}$  и  $N(\delta) \leq 2^\delta - 1$ .

Рассмотрим техническую реализацию схем ФН на магнитных токовых переключателях (МТП) [5]. Она имеет некоторые особенности, влияющие на схемы нейронов и на процесс синтеза ФН.

Первая особенность схем на МТП — многотактность работы. Запись информации и считывание ее с сердечников МТП необходимо распределить во времени по тактам, а все токи, действующие на сердечник в течение одного такта, должны перемагничивать его в одном направлении — «вверх» или «вниз». Амплитуда любого импульса тока, действующего по управляющим обмоткам записи информации, должна быть достаточной для полного перемагничивания сердечника по предельной петле гистерезиса за время действия импульса. При считывании схем на МТП используется различие индуктивных сопротивлений многовитковых распределяющих обмоток в зависимости от направления

намагниченности сердечников. Следствием считывания являются различные по месту возникновения сигналы «1» и «0». Прямые и инверсные выходы, пригодные для записи информации на другие сердечники, — вторая особенность схем на МТП, — позволяют строить экономичные схемы узлов взаимодействия ФН, содержащие не более двух сердечников.

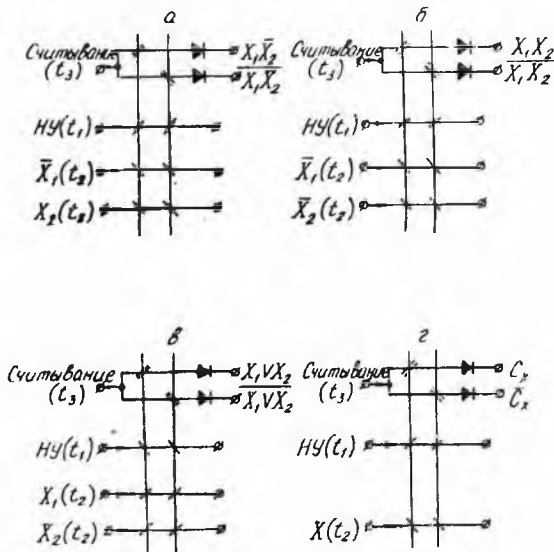


Рис. 1.

На рис. 1 приведены схемы узлов однократного взаимодействия [3], работа которых описывается соответственно выражениями (1), (3), (5) и (7). Узлы взаимодействия работают в течение трех тактов. В первом по шине  $NY$  производится начальная установка сердечников. Во втором вводятся все переменные или их инверсии. При этом в схемах реализуются требуемые логические функции, значения которых фиксируются в виде состояний сердечников. В третьем такте считываются значения функции, реализованной во втором такте. Справа от выходных клемм записаны логические функции, реализуемые в данном узле взаимодействия. На рис. 2 представлены схемы узлов двух- и трехкратного взаимодействия, описываемые соответственно выражениями (1) и (7).

Габариты и стоимость технической реализации ФН определяются количеством оборудования (сердечников), входящего в схему ФН.

Сравнивая соответствующие схемы узлов взаимодействия (рис. 1, 2), легко заметить, что кратность взаимодействия волокон в узле не влияет на число сердечников, необходимых для построения узла взаимодействия. Дополнительная одновит-

ковая обмотка в узле двукратного взаимодействия по сравнению с однократным практически не приводит к заметному увеличению габаритов и стоимости всего ФН. Поэтому при реализации схем ФН на МТП, по-видимому, нет необходимости ставить задачу синтеза ФН таким образом, чтобы минимизировать количество волокон, подходящих к синапсам порогового элемента, стоимости которых максимальны [3, 4].

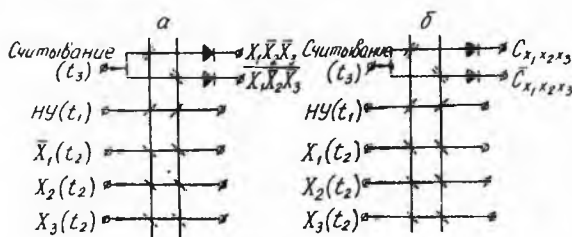


Рис. 2.

Третья особенность схем на МТП — возможность построения порогового элемента ФН таким образом, что нестабильность источников питания цепей записи переменных и порога не влияет на работу ФН, чего нельзя сказать о других известных принципах реализации пороговых элементов [6, 7, 8]. Это достигается за счет того, что переменные со своими весовыми коэффициентами и порог записываются на пороговые сердечники одним током [9, 10].

В пороговом элементе (рис. 3) в первом такте  $t_1$  записываются входные переменные  $x_1$  и  $x_2$  (или их инверсии) на сердечники  $C_1$  —  $C_4$ , а код величины порога — на сердечники  $C_5$  —  $C_8$  по одной из шин Код  $\theta$ . В этом же такте по шине  $НУ$  производится начальная установка пороговых сердечников  $C_9$  и  $C_{10}$ .

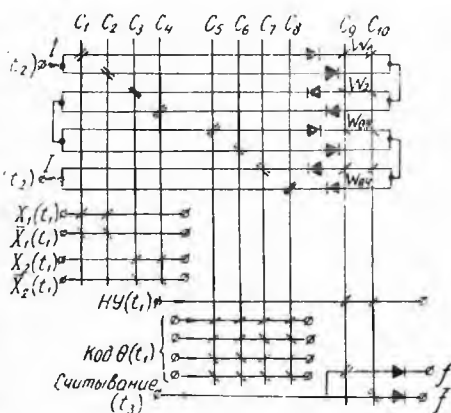


Рис. 3.

Во втором такте  $t_2$  током  $I$  считываются прямые или инверсные значения входных переменных с сердечников  $C_1$  —  $C_4$ , задается порог  $\theta$  путем пропуска этого же тока  $I$  по одной или обоим пороговым обмоткам  $w_{\theta 3}$ ,  $w_{\theta 4}$  (определяется кодом величины порога), которые включены последовательно с обмотками  $w_9$  и  $w_{10}$  записи переменных на пороговые сердечники  $C_9$  и  $C_{10}$ , и реализуется логическая функция.

Количество витков в обмотках  $\omega_1, \omega_2$  записи переменных на пороговые сердечники и в пороговых обмотках  $\omega_{n3}, \omega_{n4}$  определяется значениями весовых коэффициентов переменных  $k_j$  и требуемой величиной порога  $\Theta$ , а направление намотки — знаками весовых коэффициентов и порога.

В зависимости от того, введены или нет инверсные либо прямые значения входных переменных, ток  $I$  станет проходить по нижним или верхним шинам распределения сердечников  $C_1 — C_4$  и  $C_5 — C_8$ . Ток при помощи обмоток  $\omega_1, \omega_2$  и  $\omega_{n3}, \omega_{n4}$  будет вводить на пороговые сердечники  $C_9$  и  $C_{10}$  соответственно нулевые или отличные от нуля значения весовых коэффициентов переменных (положительные или отрицательные) и порог  $\Theta$  требуемой величины.

При этом вследствие того, что логическая функция реализуется одним током  $I$ , вводящим на пороговые сердечники переменные  $x_i$  и порог  $\Theta$ , на выходе порогового элемента в такте считывания ( $t_3$ ) имеем единичное значение функции при выполнении условия

$\sum_{i=1}^6 x_i \omega_i I > \Theta$ . Но так как  $\Theta = I \omega_n$ , то

$$I \sum_{i=1}^6 x_i \omega_i \geq I \omega_n,$$

или

$$\sum_{i=1}^6 x_i \omega_i \geq \omega_n. \quad (22)$$

Анализ выражения (22) показывает, что работа порогового элемента не зависит от величин токов записи переменных и тока  $I$ , реализующего логическую функцию, и определяется только соотношением между количеством витков в пороговых обмотках  $\omega_n$  ( $\omega_{n3}, \omega_{n4}$ ) и в обмотках  $\omega_1, \omega_2$  записи переменных на пороговые сердечники. Эти соотношения, устанавливаемые при изготовлении порогового элемента, выдерживаются довольно просто, так как число витков в обмотках записи переменных и в пороговых невелико и может быть только целочисленным.

Используя в узлах пресинаптического взаимодействия рассмотренные выше схемы (рис. 1, 2), на основании порогового элемента (рис. 3) можно строить формальные нейроны с различными типами взаимодействия входных волокон.

Два варианта многофункциональных ФНЗ, работающих аналогично описанному выше пороговому элементу (рис. 3) и реализующих один и тот же набор логических функций, показаны на рис. 4 и 5. Функциональные схемы нейронов приведены на рис. 6. Второй вариант ФН отличается от первого меньшим количеством входных волокон и синапсов у порогового элемента, но большим числом узлов с двукратными взаимодействиями при одинаковом количестве парных взаимодействий. Как было пока-

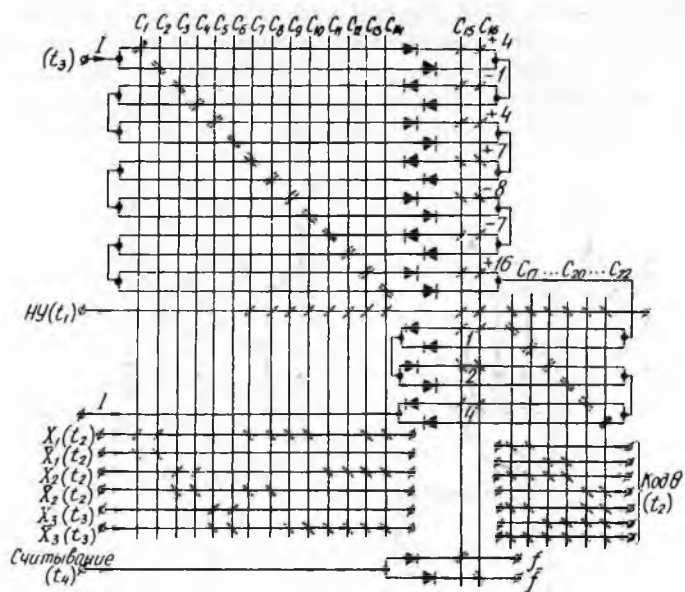


Рис. 4.

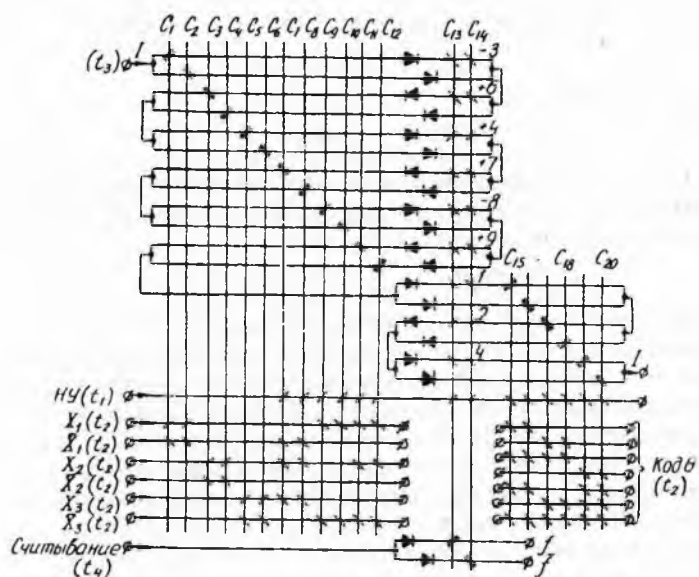


Рис. 5.

зано выше, возрастание кратности взаимодействия входных волокон не приводит к увеличению оборудования, входящего в схему ФН. Из рис. 4—6 видно, что количество оборудования, необходимого для построения ФН, зависит от числа различных порогов  $N$  (а следовательно, и от  $\delta$ ) и синапсов  $M_n$  порогового элемента ФН. Иными словами, количество оборудования, необходимого для построения ФН, зависит от его логических возможностей.

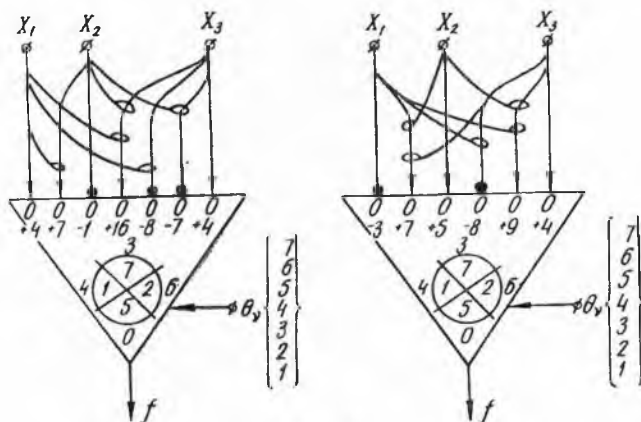


Рис. 6.

1. Для монофункциональных ФНЗ, ФНР, ФНО, ФНСЗ число сердечников определяется выражением

$$G_1 = 2(M_n + 1), \quad (23 \text{ а})$$

или с учетом (10)

$$G_1 \leq 2^{\delta+1}. \quad (23 \text{ б})$$

2. Для многофункциональных ФНЗ, ФНР, ФНО, ФНСЗ с постоянными весовыми коэффициентами входов ( $R = 1$ ) и переменным порогом  $\Theta$ , ( $\nu = 1, 2, \dots, N$ )

$$G_2 = 2(M_n + \delta + 1) \leq 2(2^\delta + \delta). \quad (24)$$

Однако поскольку при синтезе ФН исходной является пороговая диаграмма [3, 4], то путем ее соответствующего заполнения можно сократить общее количество оборудования по сравнению с рассчитанным по формулам (23) — (24). Кроме того, для одной пороговой диаграммы всегда имеется большое количество допустимых сочетаний неизвестных ФНЗ, при которых система уравнений, описывающих нейрон, решается полностью, а следовательно, и большое число вариантов ФНЗ. Выбирая вариант ФНЗ с минимальным количеством синапсов у порогового элемента, можно также сократить общее количество сердечников.

входящих в схему ФН, по сравнению с рассчитанным по (23) — (24) (рис. 5).

В зависимости от класса функций, реализуемых нейроном, количество оборудования, входящего в схемы нейронов с разными типами пресинаптического взаимодействия, может быть различным, несмотря на равенство функциональных возможностей ФН со всевозможными типами взаимодействия и эквивалентность технической реализации узлов взаимодействия на МТП. Целесообразность использования того или иного типа взаимодействия определяется наименьшими затратами оборудования на реализацию ФН. При этом необходим сравнительный анализ числа сердечников, требуемых для создания различных типов нейронов, которые реализуют заданные логические функции, и выбор наиболее экономичного варианта.

Среди нейронов с минимальным количеством сердечников для технической реализации на МТП следует выбирать не любой, а такой вариант нейрона, у которого сумма модулей весовых коэффициентов и порогов минимальна:

$$\min \left[ \sum_{j=1}^{M_n} |k_j| + \sum_{v=1}^N |\theta_v| \right]. \quad (25)$$

Условие (25) обусловлено тем, что обмотки записи переменных и пороговые размещаются в отверстиях пороговых сердечников, площади которых ограничены. Поэтому с точки зрения технической реализации формальных нейронов на МТП задача синтеза ФН состоит в отыскании структуры нейрона с наименьшим числом синапсов и минимальной при этом суммой модулей весовых коэффициентов и порогов (25) с целью сокращения количества оборудования, участвующего в реализации и перестройке логики ФН.

Инверсные и прямые выходы у МТП узлов взаимодействия (активные ноль и единица) обуславливают необходимость введения на пороговые сердечники инверсных значений переменных с нулевыми весовыми коэффициентами, а прямых значений переменных — с отличными от нуля весовыми коэффициентами. Другими словами, реализация ФН даже с постоянными весовыми коэффициентами на МТП предопределяет запись переменных на пороговые сердечники с двумя различными весовыми коэффициентами (рис. 3—5). Количество оборудования, входящего в схему нейрона, каждая переменная которого имеет два весовых коэффициента (один из них равен нулю), устанавливается по выражению (24). При необходимости получения более двух значений весовых коэффициентов какой-либо переменной с целью записи ее на пороговые сердечники можно применять схемы, аналогичные используемым для перестройки порога у рассмотренных выше порогового элемента (рис. 3) и нейронов (рис. 4, 5). Дать же оценку количества сердечников для таких ФН пока не представляется возможным, так как отсутствуют оценки

количества различных весовых коэффициентов по отдельным сигналам.

Параметрическая надежность работы ФН на МТП не зависит от параметров деталей, входящих в схему нейрона, и нестабильности источников питания, так как логика нейронов на МТП перестраивается путем кодовой настройки ФН на выполнение требуемой функции.

При необходимости многократного выполнения одной и той же операции с помощью многофункциональных ФН иногда целесообразно выполнить нейрон с запоминанием кода реализуемой операции, т. е. с запоминанием весовых коэффициентов переменных и порога. Это дает возможность повысить быстродействие нейрона за счет исключения такта ввода кода операции в промежуточных циклах реализации последней. Запоминание кода операции — это запись кода весовых коэффициентов переменных с основных сердечников на вспомогательные в такте реализации операции и обратная перезапись со вспомогательных сердечников на основные в такте записи переменных [11].

Однако передача нейрону функций запоминания кода операции значительно усложняет его. При этом количество оборудования, необходимого для реализации ФНЗ, ФНР, ФНО, ФНСЗ, каждая переменная которых имеет два весовых коэффициента (один из них равен нулю), определяется выражением

$$G_2^* = 2(3M_n + 2\delta + 1) \leq 4(3 \cdot 2^{z-1} + \delta - 1) \quad (26)$$

Дать же количественную оценку оборудования для нейронов с большим количеством дискретных значений весовых коэффициентов пока не представляется возможным.

Проведенный в данной работе анализ структурной сложности ФН и особенностей их технической реализации на МТП позволяет разработчику, проектирующему вычислительные структуры из ФН, заранее оценивать предельные значения основных конструктивных параметров, количество необходимого оборудования намечаемых к использованию формальных нейронов и в соответствии с этим правильно выбирать наиболее рациональные пути их технической реализации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. Б. Гутчин, А. С. Кузичев. Бионика и надежность. М. «Наука», 1967.
2. В. И. Потапов. Формальные нейроны как элементы систем автоматического управления и вычислительной техники. Сб. «Энциклопедия измерения, контроля и автоматизации», вып. 14. М., 1970.
3. С. О. Мкртчян. Нейроны и нейронные сети. М., «Энергия», 1971.
4. С. О. Мкртчян. Алгоритм построения формального нейрона с оптимальными параметрами. «Изв. АН СССР, Техническая кибернетика», № 4, 1965.
5. В. Н. Алексеев и др. Цифровые схемы распределения тока. М. «Энергия», 1969.

6. М. А. Розенблат. Пороговый элемент. Авт. свид. № 206897 ОИПОТЗ, № 1, 1968.

7. С. О. Мкртчян, В. И. Потапов. Формальный нейрон. Авт. свид. № 204729. ОИПОТЗ, № 2, 1967.

8. С. Е. Казарян и др. Пороговый логический элемент. Авт. свид. № 266837. ОИПОТЗ, № 12, 1970.

9. Ю. И. Крылов. Пороговый логический элемент. Авт. свид. № 244393. ОИПОТЗ, № 18, 1969.

10. П. В. Миренков, В. И. Потапов. Многопороговый логический элемент. Авт. свид. № 320057. ОИПОТЗ, № 33, 1971.

11. Л. П. Афиногенов, В. Г. Колосов. Ферритовый переключатель. Авт. свид. № 142819. «Бюллетень изобретений», № 22, 1961.

## СИНТЕЗ МИНИМИЗИРОВАННЫХ ФОРМАЛЬНЫХ НЕЙРОНОВ НА МАГНИТНЫХ ТОКОВЫХ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯХ

*Л. В. Воронкова*

Задача оптимизации формальных нейронов ФН на этапе их абстрактного синтеза формулируется в тесной связи с принципом их технической реализации. Так, при создании ФН на базе электронных транзисторных схем определяется минимальность его волокон или весовых коэффициентов.

В последнее время появились схемы на магнитных токовых переключателях МПТ, в которых использованы малогабаритные сердечники с ППГ [1]. Построение ФН на МПТ продиктовано рядом преимуществ последних [2]:

1) простотой схемного выполнения элементов ФН — синапсов, порогов, весовых коэффициентов, пресинаптического взаимодействия волокон и т. п.;

2) экономичностью схем, их широкими логическими возможностями, свойством запоминания;

3) высокой надежностью схем, их малой критичностью к изменению параметров элементов и сигналов;

4) возможностью использования в тяжелых климатических условиях.

При технической реализации ФН на МПТ задача минимизации ФН на этапе его абстрактного синтеза состоит прежде всего в получении минимального числа синапсов нейрона. При этом вопрос о числе волокон в синтезируемом нейроне может рассматриваться двояко. В одних задачах допустимо поставить условие минимизации и волокон наряду с синапсами. В других, например, в задачах с режимом перестройки, адаптации, где требуется предусмотреть логическую избыточность, может возникнуть необходимость исключения логически «бедных» волокон (волокон без взаимодействия, с одним взаимодействием и т. п.) и сохранения в схеме логически «богатых» волокон с многократным взаимодействием.

Такая постановка задачи синтеза ФН на МПТ обосновывается тем, что затраты на оборудование (выбор числа сердеч-

ников) для схемного выполнения элементов ФН неодинаковы: реализация синапса требует группы сердечников, пресинаптического взаимодействия волокна — двух сердечников, а выполнение многократного взаимодействия по сравнению с однократным практически не усложняет схемы, так как осуществляется лишь дополнительной прошивкой соответствующих имеющихся сердечников.

Итак, задачу абстрактного синтеза ФН, реализуемого на МПТ, можно сформулировать следующим образом: *по заданной пороговой диаграмме синтезировать ФН (ФНЗ, ФНР, ФНО) с минимальным числом синапсов и произвольным выбором числа волокон (в возможных пределах).*

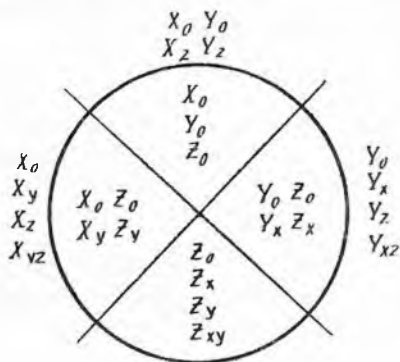


Рис. 1.

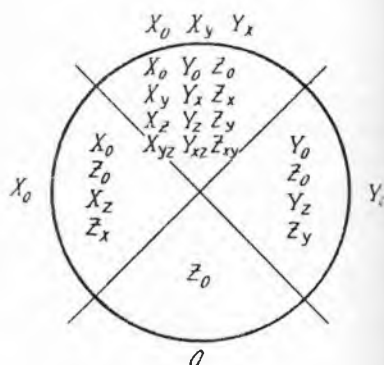


Рис. 2.

Произвольная минимизация синапсов ФН за счет усложнения логических взаимодействий входных волокон невозможна. Минимизировать число синапсов можно только при некоторых соотношениях активностей, записанных в ячейках пороговой диаграммы ПД, и целенаправленном использовании их в процессе синтеза ФН. Многие соотношения активностей, приводящие к сокращению синапсов и волокон, получаются в результате анализа системы уравнений для синтеза ФН различных типов и таблицы синтеза [3].

Ниже излагается методика синтеза ФН с минимальным количеством синапсов для числа функциональных входов  $\delta = 3$  и для одного равенства соотношений активностей  $N = 1$  пороговой диаграммы ПД. Методика сопровождается необходимыми пояснениями.

1. Проанализировать ПД и зафиксировать имеющиеся равенства активностей.

2. Заменить активности ячеек в равенстве п. 1 разновидностями синапсов, входящими в эти ячейки для ФНЗ, ФНР, ФНО (рис. 1—3). Полученные соотношения назовем уравнениями минимизации.

3. Из полного набора синапсов (состоящего из всех возможных их разновидностей) исключить синапсы, входящие в уравнение минимизации. Полученные таким образом наборы синапсов для ФНЗ, ФНР и ФНО назовем располагаемыми наборами.

4. Составить предназначенный каждому из располагаемых наборов для ФНЗ, ФНР и ФНО такой набор, который содержит в допустимых сочетаниях  $2^2 - 1 = N$  синапсов, где  $N$  — число равенств в пороговой диаграмме ПД, или количество сокращаемых синапсов. Этот набор назовем рабочим. Для  $\delta = 3$  и  $N = 1$  в рабочем наборе будет шесть синапсов.

Если для какого-либо типа ФН рабочий набор составить невозможно, то это означает, что ФН данного типа не может быть минимизирован по числу синапсов. Но если из располагаемого набора ФН того или иного типа можно составить рабочий набор, то, как правило, он имеет несколько вариантов. Следует отдать предпочтение тому из них и тому типу ФН, который содержит меньшее количество пресинаптических взаимодействий или волокон.

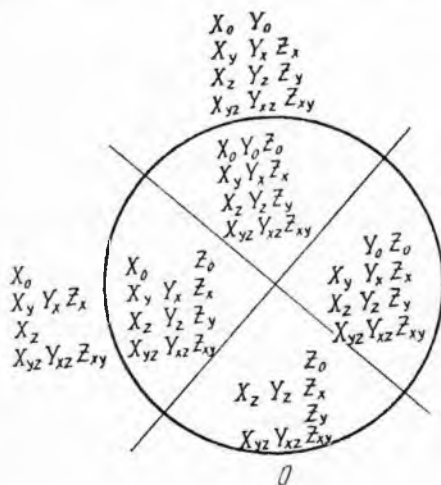


Рис. 3.

Критерий допустимости сочетаний синапсов в рабочем наборе можно сформулировать следующим образом:

а) в левую часть уравнений синтеза ФНЗ — (1), ФНР — (2) и ФНО — (3), известных из [3], должен входить хотя бы один синапс из рабочего набора:

$$\begin{aligned}
 X_z + Y_z - Z_0 &= e - a; \\
 X_y + Z_y - Y_0 &= d - a; \\
 Y_x + Z_x - X_0 &= b - a; \\
 X_y + Y_x - Z_{xy} &= b + d - a - c; \\
 X_z + Z_x - Y_{xz} &= b + e - a - f; \\
 Y_z + Z_y - X_{yz} &= d + e - a - h; \\
 X_{yz} + Y_{xz} + Z_{xy} &= a + c + f + h - b - d - e; \\
 X_0 &= h; \\
 Y_0 &= f; \\
 Z_0 &= c; \\
 X_y + Y_x &= e - f - h;
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$$\tag{2}$$

$$\begin{aligned}
X_z + Z_x &= d - c - h; \\
Y_z + Z_y &= b - c - f; \\
X_{yz} + Y_{xz} + Z_{xy} &= a + c + f + h - b - d - e; \\
X_0 &= a - b; \\
Y_0 &= a - d; \\
Z_0 &= a - e; \\
X_u + Y_x &= b + d - a - c; \\
X_z + Z_x &= b + e - a - f; \\
Y_z + Z_y &= d + e - a - h; \\
X_{yz} + Y_{xz} + Z_{xy} &= a + c + f + h - b - d - e;
\end{aligned} \tag{3}$$

б) в рабочем наборе должны быть синапсы от всех функциональных входов.

Обоснование критерия несложно: во-первых, если в левую часть одного из уравнений (1)—(3), с помощью которых в [3] различаются недопустимые сочетания синапсов, не будет входить ни один синапс из рабочего набора, то это уравнение превращается в новое равенство, не свойственное данной ПД. Во-вторых, если в рабочем наборе нет хотя бы одного синапса от какого-либо из функциональных входов, то это означает появление нового требования  $h = 0$ ,  $f = 0$  или  $c = 0$  (для  $\delta = 3$ ), что не имеет места в заданной ПД.

5. Составить систему уравнений, включающих синапсы из выбранного в п. 4 рабочего набора, и определить их весовые коэффициенты [3].

**Примечание.** При наличии в ПД  $N$  равенств соотношений активностей по данной методике для каждого равенства должен быть составлен располагаемый набор синапсов. Если из располагаемых наборов для какого-либо типа ФН можно получить хотя бы один рабочий набор из  $2^{\delta} - 1 - N$  синапсов, входящих одновременно во все располагаемые наборы в допустимых сочетаниях, то, значит,  $N$  равенств в ПД позволили сократить такое же количество синапсов в ФН. Однако это возможно лишь в отдельных частных случаях ПД, а в общем случае количество сокращаемых синапсов равно числу только тех равенств, располагаемые наборы которых позволяют составить рабочий набор.

Рассмотрим

**Пример.** Задано синтезировать формальный нейрон по пороговой диаграмме Мак-Каллока — ПДМ (рис. 4);

1) пусть в ПДМ зафиксировано равенство  $a = b + e$ ;

2) уравнения минимизации для ФНЗ, ФНР и ФНО получаются заменой активностей  $a$ ,  $b$ ,  $e$  синапсами, расположенными в этих ячейках (рис. 1—3);

$$\begin{aligned}
&\text{ФНЗ} \\
Y_0 + Y_x + Y_z + X_z + Z_x &= 0; \\
&\text{ФНР}
\end{aligned}$$

$$X_z + Z_x + X_{yz} + Y_{xz} + Z_{xy} = 0;$$

ФНО

$$Y_0 + X_y + Y_x + X_z + Z_x + Y_z + Z_y + X_{yz} + Y_{xz} + Z_{xy} = 0;$$

3) располагаемые наборы для ФНЗ, ФНР, ФНО имеют вид ФНЗ

$$\begin{pmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \\ X_y & Y_x & Z_x \\ X_z & X_z & Z_y \\ X_{yz} & Y_{xz} & Z_{xy} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Y_0 \\ Y_x & Z_x \\ X_z & Y_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 & Z_0 \\ X_y & Z_y \\ X_{yz} & Y_{xz} & Z_{xy} \end{pmatrix};$$

ФНР

$$\begin{pmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \\ X_y & Y_x & Z_x \\ X_z & Y_z & Z_y \\ X_{yz} & Y_{xz} & Z_{xy} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Y_0 \\ Z_x \\ X_z & Y_z & Z_y \\ X_{yz} & Y_{xz} & Z_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 & Z_0 \\ X_y & Y_x \end{pmatrix};$$

4) составить рабочие наборы.

Анализ располагаемых наборов для каждого типа ФН (п. 3) показывает, что у располагаемого набора ФНО меньше шести синапсов. Поэтому с помощью ФНО получить минимизированный ФН невозможно. Располагаемый набор ФНР содержит больше шести синапсов, но не дает возможности получить хотя бы один рабочий набор в допустимых сочетаниях синапсов. Только располагаемый набор ФНЗ позволяет выбрать немалое количество вариантов рабочих наборов. Следует остановиться на том из них, который предпочтительнее по числу пресинаптических взаимодействий и волокон.

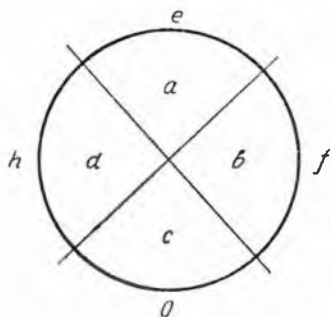


Рис. 4.

Возможны, например, следующие варианты рабочих наборов.

*Вариант 1:* 6 синапсов, 12 волокон

Рабочий набор

$$\begin{pmatrix} X_0 & Z_0 \\ X_y & Z_y \\ X_{xz} & Y_{xz} \end{pmatrix}.$$

*Вариант 2:* 6 синапсов, 13 волокон

Рабочий набор:

$$\begin{pmatrix} X_0 & Z_0 \\ X_y & Y_x \\ X_{yz} & Y_z & Z_{xy} \end{pmatrix}.$$

Возможны и другие варианты рабочих наборов с тем же числом синапсов и волокон. Из вариантов 1 и 2 выбирается первый, имеющий меньшее число волокон;

5) составить уравнения для синтеза ФНЗ с синапсами, содержащимися в выбранном рабочем наборе, т. е. в варианте 1:

$$\begin{aligned} X_0 + X_y + X_{yz} &= h; \\ Y_0 + Y_{xz} &= f; \\ Z_0 + Z_y &= c; \\ X_0 + Y_0 &= e; \\ X_0 + X_y + Z_0 + Z_y &= d; \\ Y_0 + Z_0 &= b. \end{aligned}$$

Отсюда могут быть найдены весовые коэффициенты синаптических входов:

$$\begin{aligned} X_0 &= e; \\ Z_0 &= b; \\ X_y &= d - e - c; \\ Z_y &= c - b; \\ X_{yz} &= h + c - d; \\ Y_{xz} &= f. \end{aligned}$$

Данный пример не является показательным для иллюстрации варьирования числом волокон при одном и том же количестве синапсов.

С этой целью приведем другой пример, когда в ПД имеется соотношение активностей  $a + f = b + e$ . В этом случае ФНЗ, синтезированный по приводимой выше методике, может быть получен с шестью синапсами и числом волокон от 10 до 13.

*Вариант 1:* 6 синапсов, 10 волокон

Рабочий набор:

$$\begin{pmatrix} X_0 Y_0 Z_0 \\ X_y Y_z \\ X_{yz} \end{pmatrix}.$$

*Вариант 2:* 6 синапсов, 13 волокон

Рабочий набор:

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ X_y Y_x \\ X_{yz} Y_z Z_{xy} \end{pmatrix}.$$

По данной методике нетрудно даже для непороговых функций синтезировать ФН с минимизированным числом синапсов.

**Пример.** Синтезировать ФН для реализации функции  $F = X \oplus Y \oplus Z$  по данной пороговой диаграмме (рис. 5).

Для этой функции в пороговой диаграмме должно соблюдаться соотношение  $a, c, f, h > b, d, e$  и, кроме того, возможны равенства  $a = c$ ;  $a = f$ ;  $a = h$ .

Составляя уравнения минимизации по этим трем равенствам, а затем — располагаемые наборы, легко убедиться, что соответственное удаление трех синапсов невозможно, так как нельзя составить общий рабочий набор ни для одного из типов ФН. Поэтому можно удалить какой-либо один синапс.

Покажем это для равенства  $a = c$  для ФНЗ:

а) уравнение минимизации

$$X_0 + Y_0 = Z_x + Z_y + Z_{xy};$$

б) располагаемый набор для ФНЗ:

$$\begin{pmatrix} Z_0 \\ X_y Y_x \\ X_z Y_z \\ X_{yz} Y_{xz} \end{pmatrix};$$

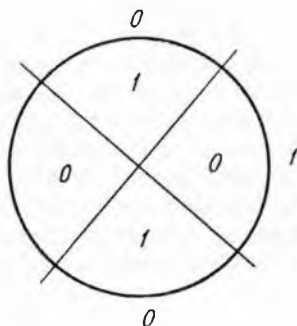


Рис. 5.

в) данному располагаемому набору соответствует множество рабочих наборов, например:

*Вариант 1:* 6 синапсов, 12 волокон

Рабочий набор:

$$\begin{pmatrix} Z_0 \\ X_y Y_x \\ X_z Y_z \\ X_{yz} \end{pmatrix}.$$

Значения весовых коэффициентов синапсов:

$$Z_0 = a = c;$$

$$X_y = d - a;$$

$$Y_x = b - a;$$

$$X_z = b + e - a - f;$$

$$Y_z = a + f - b;$$

$$X_{yz} = 2a + h + f - b - d - e$$

*Вариант 2:* 6 синапсов, 13 волокон

Рабочий набор:

$$\begin{pmatrix} Z_0 \\ X_y Y_z \\ Y_x \\ X_{yz} Y_{xz} \end{pmatrix}.$$

Значения весовых коэффициентов синапсов:

$$Z_0 = a = c;$$

$$X_y = d - a;$$

$$Y_x = b - a;$$

$$Y_z = e;$$

$$X_{yz} = a + h - d;$$

$$Y_{xz} = a + f - b - e.$$

В изложенной методике предлагается более универсальный метод синтеза минимального по числу синапсов ФН. Этот метод значительно сокращает процесс достижения конечной цели синтеза — выбора рабочего набора — по сравнению с методикой синтеза [3], где поиск рабочего набора связан с многократным просчетом массива вариантов ФН с различными рабочими наборами. Кроме того, предложенная методика позволяет минимизировать ФН во всех случаях, когда по методике [3] это не удается.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Поталов, М. Ф. Доценко. Нейроподобные элементы в режиме восстанавливающих органов (статья в настоящем сборнике).
2. В. Н. Алексеев, В. Д. Ефремов, А. Г. Леонтьев, В. Ф. Мелехин, С. П. Некрасов. Цифровые схемы распределения тока. М., «Энергия», 1969.
3. С. О. Мкртчян. Нейроны и нейронные сети. М., «Энергия», 1971.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЭВМ ПРОЦЕССА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РОДА ЗАДАННОГО СЛОВА

*Л. И. Якименко*

Модель классификации имен существительных по роду, описываемая в настоящей работе, является одной из основных составных частей общей модели морфологической классификации. Важность этой подмодели объясняется тем, что при решении ряда предыдущих задач [1] возникала необходимость задавать признак рода имен существительных. Синтез модели классификации существительных по роду и ранее рассмотренных моделей может способствовать общему решению задачи морфологической классификации без использования дополнительных признаков. Кроме того, такая модель представляет и самостоятельный интерес.

Пусть имеется множество  $S = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ , где  $x_i$  — существительное в именительном падеже единственного числа. Требуется произвести разбиение множества  $S$  на классы по отношению подобия рода.

Известно, что морфологически род имен существительных определяется характером основы и окончания и выражается самостоятельно, независимо от сочетания с другими словами. В результате предварительного анализа элементов исходного множества  $S$  можно заключить, что все существительные среднего рода, а также большинство существительных мужского и женского рода обладают достаточным набором формальных признаков (окончание, основа) для отнесения их к соответствующему роду, например: *край, внимание, окно, лес*. Однако имеется подмножество  $S' \subset S$ , элементы которого не различаются по роду на основании формальных признаков, например: *день — тень, пароль — бандероль, юноша — ноша* и др. Человек в данной ситуации руководствуется знанием словаря и признаков (одушевленность, окончание родительного падежа и др.), в противном случае он сталкивается с теми же трудностями, что и машина, — с неотличимыми альтернативами. Отсюда следует, что для получения общего решения задачи определения рода надо прибегнуть либо к помощи оператора, которая будет состоять в присваивании элементам  $S'$  дополнительных признаков, либо вместо признаков ввести в ОЗУ машины словарь. Последний способ обеспечивает полную автоматизацию процесса определения рода. Именно он и используется в настоящей работе.

При таком решении задачи моделирования возникает необходимость в разумной количественной мере словаря. Чтобы не перегружать ЭВМ задаваемой информацией и излишними операциями, должно быть

$$\frac{N_d}{N} \ll 1, \quad (1)$$

где  $N$  — полное число элементов множества  $S$ ;

$N_d$  — число слов, составляющих вводимый в машину словарь  $V$ .

Мощность подмножества  $S' \subset S$  определяется используемым словарем. Например, в случае пользования «Словарем русского языка» С. И. Ожегова подмножество  $S'$  содержит порядка 500 слов. Таким образом, в условиях нашей задачи требование (1) выполняется даже тогда, когда в качестве словаря взяты все элементы множества  $S'$ . Легко показать, однако, что словарь подобного объема является избыточным. Действительно, в задачах классификации слов по роду приходится сталкиваться с двумя неотличимыми альтернативами (мужской и женский род). Отсюда следует, что максимальный объем словаря не превышает

$$N_{d \max} = \frac{N - N_0}{2}, \quad (2)$$

где  $N_0$  — число слов, род которых различим на основании формальных признаков. Этот максимум достигается только в случае равномерного распределения существительных по роду. При

неравномерном распределении, которое только и встречается реально, необходим словарь еще меньшего объема. Пусть, например,

$$N_d = N_d^f + N_d^m, \quad (3)$$

где  $N_d^f$  — объем словаря существительных женского рода;  $N_d^m$  — объем словаря слов мужского рода. Тогда при  $N_d^f > N_d^m$  следует взять словарь, составленный из  $N_d^m$  слов, а при  $N_d^m > N_d^f$  — из  $N_d^f$  слов. Ясно, что всегда

$$N_d = \frac{N - N_0}{2} \quad (4)$$

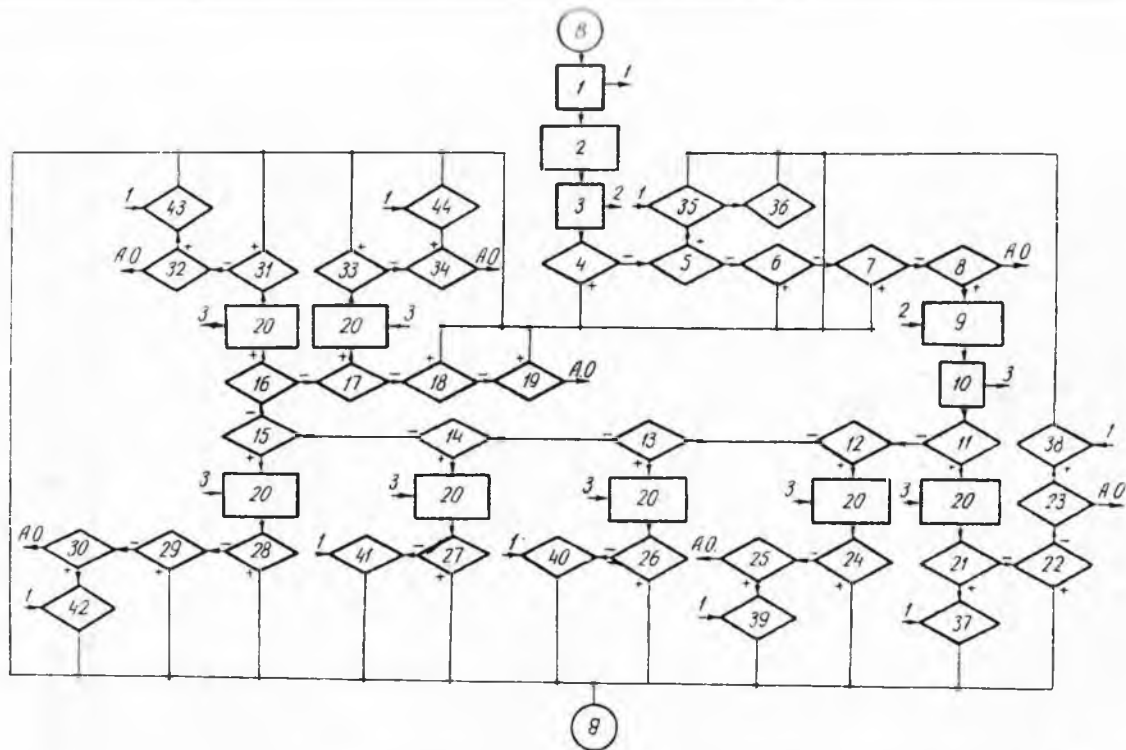
и оно может быть значительно уменьшено путем правильного выбора  $N_d^f$  и  $N_d^m$ . Использование дополнительных формальных признаков в этом классе слов приводит к уменьшению  $N_d^f$  и  $N_d^m$ . Например, существительные на *-ель* — преимущественно мужского рода, а оканчивающиеся на *-сть*, *-зь* — женского и т. д.

В нашей задаче словарь  $V$ , построенный по такому принципу, составил всего 95 слов (при  $N_{d \max} = 250$ ). Словарь  $V$  вводится в запоминающее устройство ЭВМ не единым массивом, а в виде отдельных небольших по объему словарей  $V_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 10$ ) с точно очерченными границами. Словарь  $V_1$  содержит разносклоняемые существительные среднего рода на *-мя*;  $V_2$  — слова мужского рода на *-а*, *-я*;  $V_3$  — существительные женского рода на *-ель*;  $V_4$  — слова мужского рода на *-аль*, *-оль*;  $V_5$  — существительные женского рода на *-арь*, *-ерь*, *-орь*, *-ирь*, *-урь*;  $V_6$  — слова женского рода на *-ось*;  $V_7$  — существительные мужского рода на *-ять*, *-оть*;  $V_8$  — слова женского рода на *-ень*, *-онь*;  $V_9$  — существительные мужского рода на *-едь*, *-удь*;  $V_{10}$  — слова мужского рода на *-язь*. Такое решение способствует сокращению времени, затрачиваемого на поиск слова в словаре, так как каждый из указанных словарей состоит не более чем из 15 слов.

Введение словарей значительно усложняет схему функционирования оператора преобразования  $F$ , являющегося основным оператором модели морфологической классификации, которая описана в работах [1, 2]. Блок-схема преобразователя  $F$  представлена на рисунке. Рассмотрим структуру и функционирование этого блока.

Модель оператора  $F$  состоит из блоков хранения информации ( $P_i$ ), поступающей на их вход с выхода предыдущего блока; операторов ( $U_i$ ), выделяющих последовательно  $i$ -ю букву от конца исходного слова, и распознавателей двух типов. Первые из них —  $\Phi_i$  — сравнивают заданную букву слова с константами (которые были ранее запасены в запоминающем устройстве ЭВМ буквами). Распознаватели второго типа —  $D_i$  — проверяют совпадение исходного слова со словом запасенного словаря  $V_i$ .

Распознаватели  $\Phi_i$  ( $1 \leq i \leq 5$ ) сравнивают заданную конечную букву слова с константами *о*, *е*; *а*, *я*; *й*; с согласными, включая



Принципиальная схема оператора преобразования  $F$ : 1, 3, 10—блоки хранения информации  $P_1, P_2, P_3$ ; 2, 9, 20—операторы  $U_1, U_2, U_3$ ; 4—8—распознаватели  $\Phi_1—\Phi_5$ ; 11—19—распознаватели  $\Phi_6—\Phi_{14}$ ; 21—34—распознаватели  $\Phi_{15}—\Phi_{28}$ ; 35—44—распознаватели  $\Delta_1—\Delta_{10}$ .

ж, ч, ш, щ, и с мягким знаком соответственно. Распознаватели  $\Phi_i$  ( $6 \leq i \leq 14$ ) сравнивают заданную вторую от конца слова букву с константами л, р, с, т, н, д, з, ж, ч, ш, щ, б, п, в, ф соответственно. Наконец, распознаватели  $\Phi_i$  ( $15 \leq i \leq 28$ ) производят сравнение третьей от конца слова буквы с константами е, и, у, ю, й, б, к, м; о, а; и, ы, б, х; а, о, у, е; и; с, ф; з; а, у, ю; о, е; ж, з; а, о, е, я, у; р; а, е, я соответственно.

Для реализации сравнения исходного слова со словарем  $V_i$  в схему модели введены распознаватели  $D_i$  иного класса, чем  $\Phi_i$ . Особенностью  $D_i$  является то, что, во-первых, для их функционирования необходимо обращение к исходной форме слова, которое запасается на входе модели в  $P_1$ . Это обращение отмечено на схеме стрелкой  $1 \left( \frac{1}{\langle \rangle} \right)$ . Во-вторых, в результате сравнения заданного слова со словарем  $V_i$  по знакам плюс и минус на выходе  $D_i$  вырабатывается выходной сигнал в виде кода соответствующего рода —  $f$  (женский род),  $m$  (мужской род) или  $n$  (средний род). Исключение составляет распознаватель  $D_1$ , где по знаку минус производится обращение к  $D_2$ .

Выходной сигнал  $m$  вырабатывается на выходе распознавателей  $\Phi_3, \Phi_4, \Phi_{16}, \Phi_{18}, \Phi_{25}, \Phi_{27}$ , а также  $D_2, D_4, D_7, D_9, D_{10}$ ; сигнал  $f$  — на выходе распознавателей  $\Phi_{14}, \Phi_{20}, \Phi_{21}, \Phi_{22}, \Phi_{23}$  и  $D_3, D_5, D_6, D_8$ ; наконец, сигнал  $n$  — на выходе  $\Phi_1$  и  $D_1$ .

Описанная в настоящей работе модель реализована на ЭВМ «Урал-4». В реальной программной модели использованы стандартные подпрограммы составленной нами библиотеки СП, в частности, СП ввода исходной информации, СП дифференциации слова, СП сравнения и печати. Процедуры узнавания ( $\Phi_i$ ) и сравнения исходного слова со словарем ( $D_i$ ) также выделены в СП и подключены к системе АВСП.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. П. Шабанов-Кушнаренко, Л. И. Якименко. Об одной математической модели морфологической классификации множества имен существительных русского языка. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6. Изд-во Харьковск. ун-та, 1970.
2. Ю. П. Шабанов-Кушнаренко, Л. И. Якименко. Математическая модель определения классов одинаковых слов. Сб. «Проблемы бионики», вып. 7. Изд-во Харьковск. ун-та, 1970.

### ОБ ОДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ И АКТУАЛИЗАЦИИ ПОНЯТИЙ

*С. И. Шапиро, А. И. Шапиро*

Попытаемся математически описать механизм процесса сокращения (свертывания) мыслительных структур при формировании понятий у человека [1].

Мыслительный акт направлен на снятие неопределенности, содержащейся в объекте, для субъекта [2]. В связи с этим в модели каждому состоянию объекта ставим в соответствие символ — логическое условие, имеющее конечное множество значений (исходов). Сокращение набора альтернатив, его перестройка, является одной из характеристик количества информации, извлекаемой в акте познания, т. е. свидетельствует об уменьшении неопределенности.

Мыслительному ходу отвечает оператор. Упорядоченная последовательность операторов и логических условий описывается алгоритмом (например, типа Ляпунова) [3]. Так, понятию «высота треугольника» соответствует алгоритм

$$Aa \uparrow^1 B\bar{b} \uparrow^2 Cc \uparrow^3 Dd \uparrow^4 H \downarrow^5 \bar{H}.$$

Операторы означают проверку совпадения конца отрезка с вершиной треугольника ( $A$ ), принадлежности второго конца противоположащей стороне ( $B$ ) или ее продолжению ( $C$ ), перпендикулярности отрезка к направлению этой стороны ( $D$ ). Другой вид операторов — утверждения: отрезок — высота ( $H$ ), не высота ( $\bar{H}$ ).

Логические условия  $a, b, c, d$  равны единице, если после срабатывания соответствующего заглавного оператора получается ответ «да», и нулю — в противном случае. (Напомним, что при равенстве единице логического условия, не обращая внимания на поднимающуюся после него стрелку, переходят к следующему оператору; при равенстве же нулю — к оператору, перед которым опускается стрелка с таким же номером).

В результате обучения школьников и студентов вуза математике с помощью алгоритмов по мере усвоения понятия происходит «свертывание» алгоритма, его сокращение в мышлении [4]. Этот процесс заключается в следующем.

1. *Объединение нескольких операторов в один.* Тогда соответствующие действия укрупняются, производятся вместе. Возникают символы повышенной информационной плотности. Назовем это склеиванием операторов. Например, для высоты склеиваются  $B$  и  $C$ , образуя нерасчлененный оператор  $\{BC\}$ , затем —  $\{BCD\}$  и т. д. Если несколько операторов содержат одинаковые действия (имеют непустое пересечение), то при склеивании они «накладываются» своими общими частями, что приводит к дальнейшему сокращению состава действий. В этом случае говорим о склеивании с поглощением. Так, в алгоритме высоты отдельные кодовые группы  $BD$  и  $CD$  склеиваются по оператору  $D$ . Данный процесс формализуется преобразованием булевой алгебры

$$BD \vee CD \leftrightarrow (B \vee C) D.$$

2. *Выпадение отдельных операторов из процесса рассуждения (сознавания).* Первыми перестают отражаться (по крайней мере,

во внешнем плане) операторы, которые описывают чаще всего повторяющиеся в конкретных ситуациях (задачах) действия и признаки. Наконец, операторный компонент алгоритма почти полностью элиминируется, «погружаясь» в логические условия, которые выступают в «чистом виде» связей, переходов, инвариантных относительно конкретных действий.

Рассматриваемый алгоритм высоты преобразуется к логической формуле  $a(b \vee c)d$ , или, словесно,  $a$  и  $(b$  или  $c) d$ .

Теперь одни и те же логические условия при решении задач вызывают различные операторы. Исходные формы теряют свою жесткость, возникает известная свобода действий.

В связи с этим различают две ступени усвоения алгоритма человеком: операторную, связанную с формированием понятий, и логическую, передаваемую памяти на постоянное хранение.

Применение знаний обратно обучению. Исходной теперь является логическая форма. Дискретность, очередность операторов сменяется связностью логической формы.

3. *Вовлечение в сферу свертывания на высшем уровне усвоения отдельных логических условий.* Как правило, к свертыванию устойчивы признаки, отличающие данное понятие от близких, родственных ему. Например, в понятии «высота треугольника» подобным образом устойчив «перпендикуляр к стороне» ( $d$ ). т. е. именно то, что отличает высоту от медианы и биссектрисы. Назовем эти признаки логическими координатами. Они характеризуют объект неоднозначно, служат для ориентировки, первой прикидки и по способности «увести в сторону» близки к эвристикам [5, 6].

Понятия развертываются или не развертываются в полную логическую (операторную) форму в зависимости от результатов актуализации логических координат, которые, таким образом, выполняют функцию «модели потребного будущего» (Н. А. Бернштейн), акцептора действия (П. К. Анохин) [7]. Сами логические координаты в мышлении часто не осознаются, маскируются конкретным видом зависимостей. Отсюда иллюзия, что задача решается без видимых действий путем одноактной догадки.

Логические координаты не обязательно развертываются в те действия, от сокращения которых они происходят, проявляют готовность к синтезу, могут стать зародышем производных мыслительных процессов.

Теперь путь к знаниям через алгоритмические описания — не единственный и не главный: одни логические формы вызревают в недрах других путем «деления», развития отдельных логических координат. Последние не являются раз и навсегда данными. В зависимости от условия задачи логическая форма как бы поворачивается к ней разными признаками и те или иные вычлениваются из них в качестве логических координат. При неправильном формировании понятий могут возникнуть квазилогические координаты (например, такая координата для высоты — «сверху

вниз под прямым углом» — широко распространена в школьной практике).

В ряде случаев недостаточность управления мышлением со стороны логических координат приводит к расчленению логических и операторных компонентов — к рассогласованию между различными уровнями управления. Мы называем этот феномен разрывным мышлением. Так, в ходе иерархического перекодирования возникает уровневая структура мышления и знания. Алгоритмы выступают здесь как регулярный метод воспитания более высоких форм обучения и мышления.

Следующая задача — найти надежные методики выявления («вывода вовне») логических координат на всех этапах их формирования для контроля, коррекции, прогнозирования мыслительного процесса.

С этой целью поставлены специальные эксперименты.

*Эксперимент 1.* Приводимый ниже текст диктовался группе испытуемых, пробелы заполнялись ими по ходу чтения.

1. «В задаче говорилось об отрезке, часто встречающемся в треугольнике, и я подумал о...»

2. «Оказалось, что отрезок делит сторону треугольника пополам, и я решил, что, вероятно, это...»

3. «Потом выяснилось, что треугольник — равносторонний и отрезок не является биссектрисой; тогда мне показалось, что это...»

4. «Рассуждение показало, что отрезок не проходит через вершину треугольника, и я пришел к заключению, что речь идет о...»

В опыте участвовало 300 студентов и школьников. Цель эксперимента — исследовать, как по мере раскрытия ситуации изменяются, уточняются ориентиры у испытуемых. Учитывалось, что все альтернативы входят в состав известного испытуемым обобщения, которое можно условно назвать «основными линиями в треугольнике». В зависимости от динамики задачи тот или иной компонент обобщения вычленялся в качестве ведущего, т. е. логической координаты.

Обсуждение результатов. В эксперименте выявлена основная «траектория» соответственно разворачивающейся последовательности признаков: высота (В), медиана (М), средняя линия (С). У большинства испытуемых выбор вариантов является процессом последовательного приближения, адаптивного. Однако у некоторых он связан с блужданиями, неспособностью к переключению, с противоречиями условию. В этой связи представляют интерес случаи, когда человеку приходится отказаться от начального предположения.

Рассмотрим траекторию ВВВС. В приводимом ниже ходе беседы удалось уточнить некоторые детали мышления испытуемого.

Учащийся решил, что условие не противоречит допущению (В), если треугольник — равнобедренный. То, что треугольник — равносторонний (условие З), усилило такую уверенность. При

этом, разумеется, упускалось из виду, что тогда бы отрезок был биссектрисой, — факт, известный испытуемому.

А аналогичный «застой», связанный со слабостью переключения, когда выбранный образ вступает в конфликт с условием задачи, наблюдался и у других испытуемых (как правило, имеющих ограниченный математический потенциал). Человек исходил не из объективности ситуации, а из своей оценки последней, навязывая гипотезу задаче.

Дальнейшее изучение механизма логических координат связано с их числовой оценкой. Для этого используется понятие смыслового пространства [8—10].

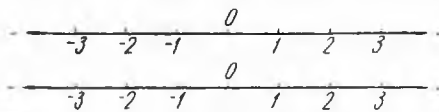


Рис. 1.

*Эксперимент 2.* Спустя неделю после описанного эксперимента 1 испытуемым, прошедшим предварительную тренировку, было предложено

оценить на двух координатных осях значения всех понятий, названных ранее, с помощью известных критериев.

Предполагалось, что понятия, получившие высокие баллы, имеют наибольшую значимость для данного испытуемого, и это должно как-то отразиться на стратегии поиска в ходе раскрытия вероятностной ситуации. Однако при использовании методики смыслового пространства возникла некоторая трудность. Оказалось, что оценки, которые испытуемый давал одним и тем же понятиям в двух повторяющихся случаях, разделенных некоторым интервалом времени, часто отличны, а в ряде случаев и резко полярны.

Естественно было ожидать, что средние баллы для групп людей устойчивее и с меньшим разбросом. Здесь приведем лишь формулу, полученную в результате обработки данных многочисленных экспериментов по методу наименьших квадратов:

$$\sigma = 1,07 \cdot n^{-0,435},$$

где  $n$  — число испытуемых в группе;  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение контрольных баллов от основных [11].

Из формулы видно, что для  $n \geq 20$  значение  $\sigma$  почти стабилизируется:  $\sigma(20) = 0,292$ ;  $\sigma(21) = 0,286$  и т. д. В группах случайные отклонения координат практически взаимно компенсируются. На этом основании, применяя и далее методику смыслового пространства, мы использовали, как правило, средние данные для групп из 20 человек, а также оценки тех испытуемых, у которых они устойчивы в повторяющихся экспериментах.

Обсуждение результатов. Для каждого понятия (В, М, С и т. д.) получена пара координат. Стало возможным вычислить расстояния между точками-понятиями по формуле

$$\rho = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}.$$

Сформулируем понятия о центре и ядре структуры.

Определение 1. Центром структуры (Ц) называется точка, координаты которой являются средними арифметическими одноименных координат всех компонентов обобщения.

Определение 2. Ближайший к центру компонент называется ядром обобщения.

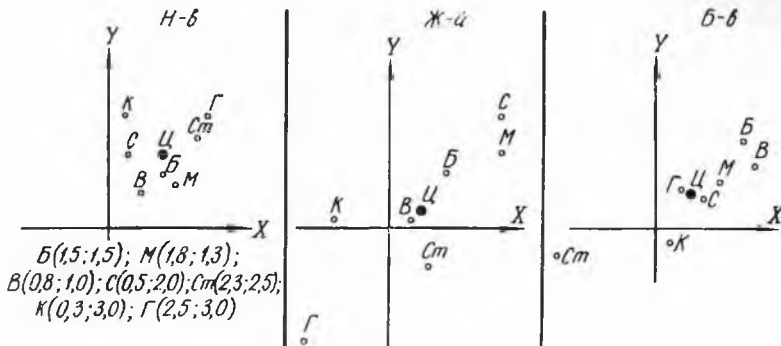


Рис. 2.

В таблице приведены координаты центра, а также расстояния от точек-понятий до центра для некоторых испытуемых ( $\tau < 0,3$ ); на рис. 2 — данные о стратегии поиска неизвестного отрезка в эксперименте 1: H-в: БМСС; Ж-й: ВМСС; Б-в: ГММС и т. д.

Испытуемый \ Точки-понятия	Координаты центра	Биссектриса — Б	Медиана — М	Высота — В	Средняя линия — С	Сторона — Ст	Катет — К	Гипотенуза — Г
Л	(1,5; 1,1)	1,2	0,5	0,6	0,9	1,3	1,3	1,6
Н	(1,4; 2,0)	0,5	0,8	1,2	0,9	1,0	1,5	1,5
Ж	(0,7; 0,4)	1,4	2,8	0,6	3,5	1,4	2,2	4,5
Б	(0,9; 0,9)	2,0	0,8	1,9	0,4	3,8	1,3	0,2
Г	(1,4; 1,7)	1,1	1,0	0,5	0,2	0,7	0,6	1,1
З	(1,0; 1,1)	0,1	0,2	0,2	1,3	0,6	0,5	0,5

Как видим, для мышления испытуемых характерна следующая закономерность: как правило, первой логической координатой является ядро.

Дальнейшая развертка структуры сложнее. Оказывается, в каждом следующем выборе испытуемые, как бы соблюдая осторожность, стараются остаться вблизи предыдущей логической координаты и, с другой стороны, не слишком далеко уйти от центра. Поиск осуществляется мелкими сдвигами. Так, например, третий

выбор производится в непосредственной близости второго, но под влиянием «притяжения» центра и в соответствии с раскрывающимся условием задачи. Шаг испытуемого, таким образом, диктуется действием постоянного, главного центра (Ц) и переменного, условно мгновенного центра, т. е. предшествующей логической координаты. В итоге обобщение словно обладает чувствительностью: каждый раз «выставляются вперед» те и только те составляющие, которые в соответствии с индивидуальной структурой наилучшим образом удовлетворяют складывающейся переменной ситуации.

Например, испытуемый *Н-в* от ядерного компонента (Б) переходит не к средней линии, а к медиане, в равной степени удовлетворяющей на данном этапе условию задачи, тогда как другие испытуемые в аналогичной ситуации обращаются к средней линии.

Итак, первый шаг: как правило, ядро; *k*-й шаг: удовлетворяющая условию задачи минимальная окрестность (*k* — 1)-го выбора при соблюдении возможно меньшего удаления от центра.

Результат, подтвержденный также данными среднегрупповых оценок, свидетельствует о центральном управлении мышлением. Сформулируем его следующим образом.

*Из всех компонентов структуры, удовлетворяющих условию задачи, всякий раз в качестве логической координаты преимущественно актуализируется тот, для которого сумма расстояний до главного и мгновенного центров минимальна.*

Это утверждение назовем гипотезой о двух центрах. Она удовлетворительно объясняет стратегию поиска, применяемую большинством испытуемых. Например, выбор испытуемым *Н-вым* медианы во втором действии следующий:

$$\begin{aligned} \rho(M, Ц) &= 0,8; & \rho(M, Б) &= 0,4 \\ \rho(С, Ц) &= 0,9; & \rho(С, Б) &= 1,1 \\ \rho(В, Ц) &= 1,2; & \rho(В, Б) &= 0,9 \text{ и т. д.} \end{aligned}$$

Легко убедиться, что  $\rho(M, Ц) + \rho(M, Б) = 1,2$  — минимально. Следовательно, именно медиана удовлетворяет гипотезе о двух центрах.

Длинный «прыжок» от (М) к (С) в третьем выборе ( $\rho(M, С) = 1,5$ ) вызван, по-видимому, отсутствием в окрестности медианы более близких точек, удовлетворяющих условию задачи.

Аналогичные результаты получены в экспериментах с другими математическими текстами: «Узнать функцию по ее свойствам»; «Определить вид сечения» и т. д.

В последующих «отчетах» испытуемых, а также в «мышлении вслух» при выполнении работы механизм центрального управления, как правило, не выявляется. Есть основание утверждать, что этот механизм (а с ним и весь «драматизм мысли» при решении задачи — колебания, отступления) в большой степени не конт-

радируется сознанием. Ясно, что модель имеет прогностическую ценность.

Экспериментально установлено, что отклонения от гипотезы о двух центрах чаще всего связаны с инертностью мышления, неспособностью к переключению. Это станет предметом особого рассмотрения.

### ВЫВОДЫ

1. Природа логических координат эвристическая.
2. Один из регулярных методов их формирования — метод с помощью алгоритмов.
3. Механизм функционирования логических координат при решении задач в первом приближении моделируется гипотезой о двух центрах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Шапиро. Об алгоритмизации процесса формирования понятий. «Вопросы психологии», 1967, № 2.
2. Ю. А. Самарин. Очерки психологии ума. М., Изд. АПН РСФСР, 1962.
3. А. А. Ляпунов, Г. А. Шестопал. Об алгоритмическом описании процессов управления. «Математическое просвещение», 1957, № 2.
4. С. И. Шапиро. Свертывание умозаключений и его связь с математическими способностями. «Новые исследования в педагогических науках», 1967, № 10.
5. А. Ньюэлл, Дж. Шоу, Г. Саймон. Процессы творческого мышления. Сб. «Психология мышления». М., «Прогресс», 1965.
6. Д. Пойа. Как решать задачу. М. — Л., Учпедгиз, 1959.
7. С. И. Шапиро. О роли акцептора действия в механизме обратной связи при переработке математической информации. Тезисы докл. III Всесоюзного съезда О-ва психологов СССР, т. I. М., 1968.
8. А. Г. Ивахненко, В. Д. Димитров. Формирование эвристик при поиске пропущенных в фразе слов. «Вопросы психологии», 1971, № 1.
9. А. Кондратов. Измерение значений. «Знание — сила», 1965, № 8.
10. С. И. Шапиро. Об одной математической модели малой группы (к вопросу об оптимальном объеме группы). Сб. «Социально-психологические вопросы общественной активности школьников и студентов» «Уч. зап. Курск. пед. ин-та», т. 88. Курск, 1971.
11. Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. Численные методы анализа. М., Физматгиз, 1963.

## К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ РАВНОВЕСИЯ ЧЕЛОВЕКА

*В. А. Внуков, Р. А. Гуревич*

При стоянии человека имеет место динамическое равновесие, зависящее, главным образом, от функций систем, регулирующих вертикальность позы. Регуляторные возможности человеческого организма обеспечивают устойчивость равновесия.

В связи с многозначностью системы поддержания равновесия человека и значительной подвижностью звеньев относительно

друг друга изучение системы представляет значительные трудности. Поэтому представляется целесообразным максимально упростить кинематическую структуру системы, сохранив ее функциональные возможности в поддержании равновесия. Очевидно, что наиболее простой моделью является кинематическая цепь, состоящая из двух звеньев.

Рассмотрим исследуемую систему во фронтальной плоскости. В поддержании равновесия человека определяющую роль играет подвижность туловища и нижних конечностей. В связи с этим целесообразно рассмотреть два варианта кинематической цепи.

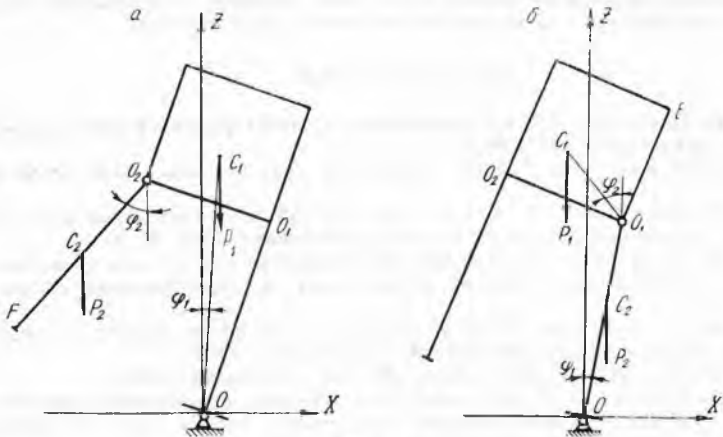


Рис. 1.

Вариант I. Подвижность сохраняется только в тазобедренном суставе опорной ноги.

Вариант II. Подвижность сохраняется только в тазобедренном суставе подвижной ноги.

И в том и в другом случае система закреплена на площадке, подвижной во фронтальной плоскости. Представления о том, что движение — плоское, звенья — жесткие, а связи в суставах осуществляются шарниром с ограниченной подвижностью, являются основными допущениями в выбранной модели.

На рис. 1, а показан вариант I двухзвенного механизма, звенья которого соединены шарнирно в тазобедренном суставе опорной ноги. При повороте системы вокруг оси вращения звенья будут взаимно смещаться таким образом, как того требуют условия равновесия. Из рассмотрения условий равновесия твердого тела под действием плоской системы сил получаем уравнение

$$\varphi_1 = \arcsin [A_0 \sin \varphi_2] + \arcsin \psi_0, \quad (1)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — соответственно углы поворота центров тяжести звеньев от вертикалей, проходящих через оси вращения  $O$  и  $O_2$

(рис. 1, а); положительные углы отсчитываются при повороте звена по часовой стрелке, отрицательные — против нее;  $A_0$  — коэффициент, учитывающий параметры системы;

$$A_0 = \frac{B_{13}}{\sqrt{B_{11}^2 + B_{12}^2}}; \quad B_{11} = P_1 l_0 + P_2 \sqrt{l_1^2 + l_3^2} \cos \theta;$$

$$B_{12} = P_2 \sqrt{l_1^2 + l_3^2} \sin \theta; \quad \psi_0 = \arccos \frac{B_{11}}{\sqrt{B_{11}^2 + B_{12}^2}}; \quad B_{13} = P_2 l_2.$$

Здесь  $l_1$  — расстояние  $O_2F$  (длина второго звена);

$l_2$  — расстояние  $O_2C_2$  от оси вращения до центра тяжести  $C_2$  второго звена;

$l_3$  — расстояние  $O_1O_2$  между центрами тазобедренных суставов;

$l_4$  — кратчайшее расстояние от центра тяжести первого звена  $C_1$  до линии тазобедренных суставов  $O_1O_2$ ;

$l_0$  — расстояние  $OC_1$  от оси вращения до центра тяжести  $C_1$  первого звена;  $\theta = \psi_1 - \xi$ , где

$$\psi_1 = \arccos \frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + l_3^2}}; \quad \xi = \arccos \frac{l_1 + l_4}{l_0};$$

$P_1$  — вес первого звена;

$P_2$  — вес второго звена.

Из уравнения (1) следует, что угол поворота первого звена является функцией нескольких переменных:

$$\varphi_1 = f(\varphi_2, l_1, l_2, l_3, l_4, P_1, P_2).$$

Рассмотрим зависимость  $\varphi_1 = f(\varphi_2)$ , считая, что все остальные параметры не меняются. Подставив значения биомеханических констант  $l_1, l_2, l_3, l_4, P_1, P_2$  [1, 2] в уравнение (1), получим

$$\varphi_1 = \arcsin [0,074 \sin \varphi_2] + 1^\circ 40'. \quad (2)$$

В результате исследования функции (2) на экстремум получим наибольший угол отклонения системы  $\varphi_{1\max} = 6^\circ$ , что соответствует углу отклонения второго звена  $\varphi_2 = 90^\circ$ .

Рассмотрим вариант II двухзвенного механизма, звенья которого соединены шарнирно в тазобедренном суставе опорной ноги (рис. 1, б).

Из анализа условий равновесия такой системы получаем уравнение

$$\varphi_1 = \arcsin [A_1 \sin \varphi_2], \quad (3)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — соответственно углы поворота центров тяжести первого и второго звеньев от вертикалей, проходящих через оси вращения  $O$  и  $O_1$ ;

$A_1$  — коэффициент, учитывающий параметры системы:

$$A_1 = \frac{P_1 \sqrt{l_4^2 + l_5^2}}{P_1 l_1 + P_2 l_2}.$$

Здесь  $l_1$  — расстояние  $OO_1$  (длина первого звена);  
 $l_2$  — расстояние  $O_1C_2$  от оси вращения до центра тяжести первого звена;  
 $l_4$  — кратчайшее расстояние от центра тяжести второго звена  $C_1$  до линии тазобедренных суставов;  
 $l_5$  — кратчайшее расстояние от  $C_1$  до линии  $O_1E$ .

Подставив значения биомеханических констант  $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, P_1, P_2$  в уравнение (3), получим

$$\varphi_1 = \arcsin [0,212 \sin \varphi_2]. \quad (4)$$

Исследовав функцию (4) на экстремум, получим наибольший угол отклонения системы  $\varphi_{1\max} = \pm 12'25'$ , что соответствует углу отклонения второго звена  $\varphi_2 = \pm 90^\circ$ .

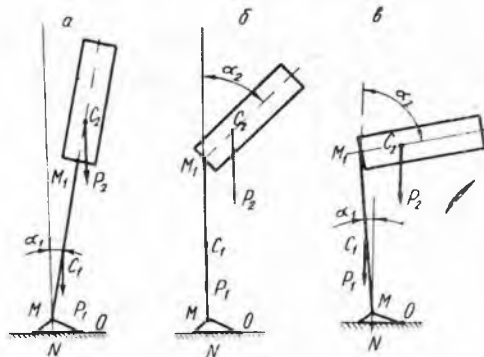


Рис. 2.

Из сравнения двух вариантов в статическом режиме следует, что равновесие во фронтальной плоскости в варианте II сохраняется при больших углах смещения площадки (диапазон изменения угла увеличивается в 2 раза). Следовательно, регуляторные возможности системы поддержания равновесия в варианте II двухзвенного механизма выше, чем

в первом. Таким образом, для рассмотрения динамики системы поддержания равновесия целесообразно в качестве физической модели использовать вариант II.

Аналогичным образом определим условия статического равновесия системы в сагитальной плоскости при стоянии на обеих ногах, когда опорная площадка горизонтальна и неподвижна.

Рассмотрим равновесие системы при наличии опрокидывающего момента вокруг точки  $O$  (ось плюсне-фалангового сустава), который создается весом наклоненного вперед туловища. Туловище наклоняется вперед лишь посредством тазобедренных и голеностопных суставов. Поэтому подвижностью в коленных суставах можно пренебречь. Наличие двух осей вращения приводит к следующим трем возможным вариантам движения туловища вокруг них.

1. Движение туловища вместе с ногами вокруг голеностопных суставов при неподвижности тазобедренных (рис. 2, а). Решив уравнение статики для этого случая, определим максимальный угол наклона из формул

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{5l_3}{2l_1 + 3l_2},$$

где  $l_1$  — расстояние  $MC_1$  между осью голеностопного сустава и центром масс ног;

$l_2$  — расстояние  $MC_2$  между осью голеностопного сустава и центром масс туловища;

$l_3$  — расстояние  $NO$  между проекцией голеностопного сустава на плоскость опоры и осью плюсне-фалангового сустава.

Подставив размеры звеньев  $l_1, l_2, l_3$  [1] в формулу (5), получим  $\alpha_{1\max} = 10^\circ$ .

2. Движение туловища вокруг тазобедренного сустава при неподвижности голеностопного (рис. 2, б). Максимальный угол наклона туловища найдется из условия равновесия по формуле

$$\alpha_2 = \arcsin \frac{5l_3}{3l_1},$$

где  $l_1$  — расстояние  $M_1C_2$  между осью тазобедренного сустава и центром масс туловища. Подставив необходимые значения в формулу, получим  $\alpha_{2\max} = 56^\circ$ .

При одновременном движении туловища вокруг тазобедренного сустава, а ног — вокруг голеностопного возможны два случая: 1) оба звена движутся в одну сторону (вперед), максимальный угол наклона туловища, очевидно, не может превышать  $56^\circ$ ; 2) при наклоне туловища вперед ноги сгибаются в обратную сторону от вертикали (рис. 2, в). Определим максимальный угол  $\alpha_{2\max}$  для второго случая. Решив уравнение статики, найдем

$$\alpha_2 = \arcsin \left[ \frac{5l_3}{3l_1} + \frac{2l_1 + 3l_3}{3l_1} \sin \alpha_1 \right],$$

где  $l_3$  — расстояние  $MM_1$  между осями голеностопного и тазобедренного суставов. Как видно из последнего выражения, угол наклона туловища является функцией биомеханических параметров тела и угла  $\alpha_1$ .

Рассмотрим зависимость  $\alpha_2 = f(\alpha_1)$ , считая, что все остальные параметры не меняются. Наибольшее плечо у опрокидывающего момента возникает при наклоне туловища на  $90^\circ$ . Определим, какой угол  $\alpha_1$  необходим при этом, из условия

$$\frac{5l_3 + (2l_1 + 3l_3) \sin \alpha_1}{3l_1} = 1.$$

Находим

$$\sin \alpha_1 = \frac{3l_1 - 5l_3}{2l_1 + 3l_3}.$$

Подставив необходимые значения, получим  $\alpha_1 = 2^\circ 35'$ .

Таким образом, даже небольшая подвижность в голеностопном суставе создает для туловища максимальный диапазон возможных движений. Однако направление этой подвижности следует считать совершенно определенным, т. е. подвижность должна

быть управляемой. Это позволяет сделать вывод о том, что взаимное перемещение звеньев в процессе поддержания равновесия носит не случайный, а целенаправленный характер.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Бернштейн. Общая биомеханика. М., изд. РИО ВЦСПС, 1926.
2. R. Martin. Lehrbuch der Anthropologie. Jena, Verlag von G. Fischer, 1928.

## НЕЙРОНОПОДОБНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В РЕЖИМЕ ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХ ОРГАНОВ

*В. И. Потапов, М. Ф. Доценко*

Нейроноподобные элементы, т. е. элементы, имеющие ряд структурно-функциональных признаков биологических нейронов, обладают большими логическими возможностями и функциональной гибкостью. Одним из возможных путей практического применения нейроноподобных элементов является использование их как восстанавливающих органов (ВО) структурно избыточных систем [1]. При этом они могут работать в неадаптивном режиме с неизменными весовыми коэффициентами  $k_i$  входов и с постоянным порогом  $\theta$  порогового элемента (ПЭ) и в адаптивном режиме — с переменными весовыми коэффициентами  $k'_i (i = 1, 2, \dots)$  и с переменным порогом  $\theta_\nu (\nu = 1, 2, \dots)$ .

В зависимости от структуры нейроноподобных ВО и алгоритма адаптации меняется их эффективность и корректирующая способность при отказах и сбоях обоих видов ( $1 \rightarrow 0$ ) и ( $0 \rightarrow 1$ ) на входах во всевозможных сочетаниях. Для рационального использования на практике различных типов нейроноподобного ВО необходимы количественные характеристики их эффективности. Это позволит на основании априорных данных о наиболее вероятной ситуации в процессе работы на входах ВО выбрать самую эффективную структуру и алгоритм адаптации нейроноподобного ВО. В статье рассматриваются математические модели трех типов нейроноподобных ВО, выводятся выражения для расчета вероятности безотказной работы резервированных систем с неадаптивными и адаптивными нейроноподобными ВО и исследуется эффективность нейроноподобных элементов в режиме ВО.

Под эффективностью соответствующего ( $j$ -го) типа  $n$ -входового нейроноподобного ВО при фиксированной совокупности интенсивностей отказов и сбоев обоих видов на его входах будем понимать зависимость

$$\gamma_{jn}(t) \Big|_{\lambda_0, \lambda_1, \lambda_0^*, \lambda_1^*} = \left[ \frac{W_{jn}(t) - W_0(t)}{n} \right]_{\lambda_0, \lambda_1, \lambda_0^*, \lambda_1^*} = \left[ \frac{\Delta_{jn}(t)}{n} \right]_{\lambda_0, \lambda_1, \lambda_0^*, \lambda_1^*} \quad (1)$$

$W_0(t)$  — вероятность безотказной работы нерезервированной системы;

$W_{jn}(t)$  — вероятность безотказной работы резервированной системы с  $n$ -входовым нейроноподобным ВО  $j$ -го типа;

$\lambda_0, \lambda_1$  — интенсивности устойчивых отказов вида  $(1 \rightarrow 0)$  и  $(0 \rightarrow 1)$  на входах ВО;

$\lambda_0^*, \lambda_1^*$  — интенсивности сбоев вида  $(1 \rightarrow 0)$  и  $(0 \rightarrow 1)$  на входах ВО.

При этом суммарные интенсивности отказов и сбоев соответственно  $\lambda = \lambda_0 + \lambda_1$  и  $\lambda^* = \lambda_0^* + \lambda_1^*$ .

Введенный таким образом критерий эффективности является средним приращением вероятности безотказной работы, обеспечиваемым в резервируемой системе одним входом нейроноподобного ВО при соответствующей интенсивности отказов и сбоев на его входах.

В ходе рассмотрения различных нейроноподобных элементов в режиме ВО будем считать (как это обычно принимается в теории надежности [2]), что процесс возникновения отказов и сбоев на входах ВО — пуассоновский. Вероятностью отказа самого ВО станем пренебрегать. Последнее не является существенным ограничением, так как конечная надежность ВО легко может быть учтена (это не изменит заметно общей картины).

В дальнейшем будем пользоваться следующими обозначениями:

$E_i$  — работоспособное состояние системы с нейроноподобным ВО, одинаково реагирующим на отказы и сбой обоих видов, при отказах и сбоях на  $i$  входах;

$E_{ij}$  — работоспособное состояние системы с нейроноподобным ВО, различно реагирующим на отказы и сбой каждого вида, при отказах и сбоях вида  $(1 \rightarrow 0)$  на входах и вида  $(0 \rightarrow 1)$  — на  $j$  входах;

$E_r$  — неработоспособное (поглощающее) состояние системы, соответствующее потере корректирующей способности нейроноподобным ВО;

$P_i, P_{ij}, P_r$  — вероятности нахождения систем с нейроноподобными ВО в соответствующих состояниях, указанных выше.

Дополнительные обозначения будут указаны в тексте.

### Неадаптивные нейроноподобные ВО

Неадаптивные нейроноподобные ВО, как указывалось выше, характеризуются постоянством значений весовых коэффициентов входов и порога в процессе работы. Рассмотрим неадаптивный ВО с  $n$  входами (рис. 1, а). На входы ВО подаются двоичные переменные  $x_i \in \{0, 1\}$ . В прямоугольнике указаны весовые коэффициенты  $k_i$  соответствующих входов, а в треугольнике — значение порога  $b$ . Таким образом, неадаптивный нейроноподобный ВО

представляет собой ПЭ с  $k_i = +1, i = 1, 2, \dots, n$  ( $n$  — нечетное) ( $n\theta = +\frac{n+1}{2}$ ), реализующий функцию

$$f_{1n} = \text{Sg} \left( \sum_{i=1}^n x_i - \frac{n+1}{2} \right), \quad (2)$$

где функция  $\text{Sg}Z$  определяется следующим образом:

$$\text{Sg}Z = \begin{cases} 0 & \text{при } Z < 0, \\ 1 & \text{при } Z \geq 0. \end{cases}$$

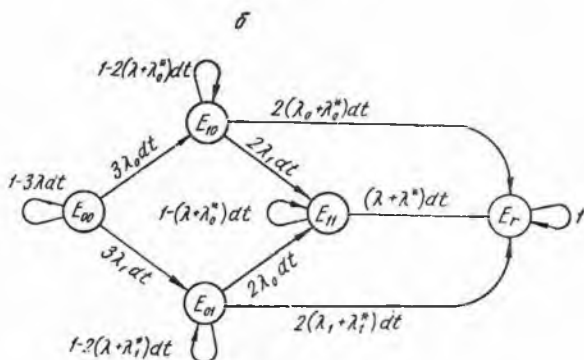
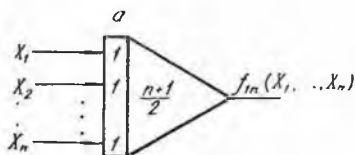


Рис. 1.

Анализ показывает, что минимальная корректирующая способность таких ВО (т. е. максимально допустимое количество самых неблагоприятных сочетаний ошибок на входах ВО, не приводящее к появлению ошибки на его входе) равна

$$\min R = \frac{n-1}{2}, \quad (3)$$

а максимальная корректирующая способность при самых благоприятных сочетаниях видов ошибок на входах ВО —

$$\max R = n-1. \quad (4)$$

Это очевидно из графа состояний резервированной системы с неадаптивным ВО при  $n = 3$  (рис. 1, б).

Сбои начинают проникать на выход неадаптивного ВО лишь при числе устойчивых отказов на его входах

$$\rho \geq \frac{n+1}{2}. \quad (5)$$

В настоящее время практически используются неадаптивные ВО с  $n = 3$  и  $n = 5$ . С целью сокращения ограничимся подробным рассмотрением лишь ВО с  $n = 3$ , но в заключительной части работы приведем результаты математического моделирования неадаптивных ВО с  $n = 3$  и  $n = 5$ .

Согласно графу (рис. 1, б), составим систему дифференциальных уравнений состояния резервированной структуры с неадаптивным ВО при  $n = 3$ :

$$\begin{aligned} P'_{00}(t) &= -3\lambda P_{00}(t); \\ P'_{10}(t) &= 3\lambda_0 P_{00}(t) - (2\lambda + \lambda_0^*) P_{10}(t); \\ P'_{01}(t) &= 3\lambda_1 P_{00}(t) - 2\lambda + \lambda_1^* P_{01}(t); \\ P'_{11}(t) &= 2\lambda_1 P_{10}(t) + 2\lambda_0 P_{01}(t) - (\lambda + \lambda^*) P_{11}(t); \\ P'_r(t) &= 2(\lambda_0 + \lambda_0^*) P_{10}(t) + 2(\lambda_1 + \lambda_1^*) P_{01}(t) + \\ &\quad + (\lambda + \lambda^*) P_{11}(t) + P_r(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Отсюда вероятность безотказной работы структуры с трехходовым ВО находится следующим образом:

$$W_{13}(t) = \sum_{i,j=0}^1 P_{ij}(t), \quad (7)$$

а вероятность отказа — по формуле

$$\theta_{13}(t) = P_r(t) = 1 - W_{13}(t). \quad (8)$$

Решив систему уравнений (6) при начальных условиях  $P_{00}(0) = 1$ ,  $P_{10}(0) = P_{01}(0) = P_{11}(0) = P_r(0) = 0$  и проведя соответствующие преобразования, получим

$$\begin{aligned} W_{13}(t) &= e^{-3\lambda t} \left\{ 1 - \frac{3\lambda_0}{\lambda - 2\lambda_0^*} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2\lambda_1}{\lambda - \lambda^* + 2\lambda_0} \right) e^{(\lambda - 2\lambda_0^*)t} \right] - \right. \\ &\quad \left. - \frac{3\lambda_1}{\lambda - 2\lambda_1^*} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{2\lambda_0}{\lambda - \lambda^* + 2\lambda_1} \right) e^{(\lambda - 2\lambda_1^*)t} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{12\lambda_0\lambda_1}{2\lambda - \lambda^*} \left[ \frac{\lambda - \lambda^*}{(\lambda - 2\lambda_0^*)(\lambda - 2\lambda_1^*)} + \frac{\lambda e^{(2\lambda - \lambda^*)t}}{(\lambda - \lambda^* + 2\lambda_0^*)(\lambda - \lambda^* + 2\lambda_1^*)} \right] \right\}. \quad (9) \end{aligned}$$

Составив соответствующий граф переходов, аналогичным образом можно найти выражение вероятности безотказной работы  $W_{15}(t)$  для неадаптивного ВО с  $n = 5$ .

### Адаптивные нейроноподобные ВО

Адаптивными будем называть такие ВО, у которых в процессе работы в зависимости от ситуации на входах (количества и вида отказов и сбоев) направленно изменяются параметры (весовые коэффициенты  $k_i^l$  входов и порогов  $\theta_i$ ), с целью достижения максимальной корректирующей способности.

При рассмотрении адаптивных нейроноподобных ВО для упрощения станем пренебрегать конечной надежностью устройства контроля и адаптации, считая, что его интенсивность отказов не менее чем на порядок ниже интенсивности отказов на входах ВО, и считать, что время контроля и адаптации равно нулю. Последнее справедливо для быстродействующих электронных устройств, имеющих, например, комбинационную схему контроля входных сигналов ВО и жесткий алгоритм адаптации. При этом полагаем, что адаптация начинается сразу же после появления отказа или сбоя на входе ВО. Будем также считать, что одновременное появление на входах ВО двух или более отказов либо сбоев невозможно.

Известны нейроноподобные адаптивные ВО, отличающиеся параметрами и алгоритмом адаптации [1, 3]. Рассмотрим два из них, включающих в той или иной мере основные структурные и функциональные принципы известных адаптивных ВО.

1. ВО с однонаправленным ступенчатым изменением порога и с бинарным изменением весовых коэффициентов входов. На рис. 2, а представлена функциональная схема адаптивного ВО рассматриваемого типа [3]. Основу ВО составляет нейроноподобный элемент с переменными весовыми коэффициентами  $k_i^{(1)}$  и переменным порогом  $\theta_v$ . Каждый  $i$ -й весовой коэффициент в результате воздействия сигнала  $Z_i$  от устройства адаптации может принимать два значения:  $k_i^{(1)} = +1$  при отсутствии на  $i$ -м входе ВО отказов и сбоев и  $k_i^{(2)} = 0$  после появления на  $i$ -м входе ВО отказа или сбоя, зафиксированного устройством контроля. Иными словами, в случае отказа или сбоя на  $i$ -м входе он отключается от ВО, а порог ВО при этом в зависимости от выбранного алгоритма адаптации остается без изменения либо по сигналу  $y$  от устройства адаптации уменьшается на единицу. Таким образом,  $\theta_v$  принимает ряд значений:  $\frac{n+1}{2}, \frac{n-1}{2}, \dots, 2, 1$ . Функция, реализуемая рассматриваемым ВО, имеет вид

$$f_{2n} = Sg \left( \sum_{i=1}^n k_i^{(1)} x_i - \theta_v \right). \quad (10)$$

Корректирующая способность такого ВО может изменяться в зависимости от функции, реализуемой ВО в последнем адаптивном состоянии, и вида преобладающих отказов и сбоев. При этом  $\min R = n - 2$ ;  $\max R = n - 1$ .

Граф переходов резервированной системы с адаптивным  $n$ -входным ВО рассматриваемого типа изображен на рис. 2, б. Указанные здесь вероятности переходов без квадратных скобок соответствуют такому алгоритму адаптации, при котором ВО в последнем адаптивном состоянии реализует функцию И. Для описания ВО, реализующего в последнем адаптивном состоянии функцию ИЛИ, на графе (рис. 2, б) необходимо заменить соот

ответствующие вероятности переходов выражениями в квадратных скобках. Системы дифференциальных уравнений, составленные для этих двух разновидностей рассматриваемого графа, отличаются лишь тремя последними уравнениями. Разница формально заключается в инверсии индексов  $i$  у  $\lambda_i$  и  $\lambda_i^*$  ( $i \in \{0, 1\}$ ).

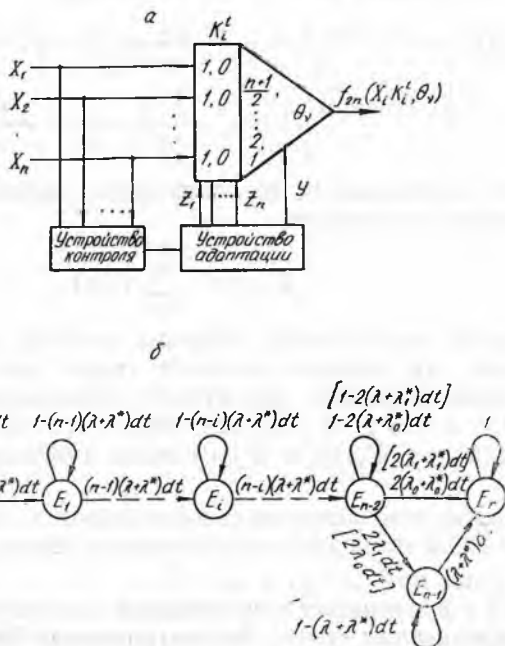


Рис. 2.

В связи с этим запишем систему дифференциальных уравнений только для первого варианта графа (рис. 2, б):

$$\begin{aligned}
 P_0'(t) &= -n(\lambda + \lambda^*) P_0(t); \\
 P_i'(t) &= (n - i + 1)(\lambda + \lambda^*) P_{i-1}(t) - (n - 1)(\lambda + \lambda^*) P_i(t) \\
 &\quad (i = 1, 2, \dots, n - 3); \\
 P_{n-2}'(t) &= 3(\lambda + \lambda^*) P_{n-3}(t) - 2(\lambda + \lambda_0^*) P_{n-2}(t); \\
 P_{n-1}'(t) &= 2\lambda_1 P_{n-2}(t) - (\lambda + \lambda_0^*) P_{n-1}(t); \\
 P_r'(t) &= 2(\lambda_0 + \lambda_0^*) P_{n-2}(t) + (\lambda + \lambda^*) P_{n-1}(t) + P_r(t).
 \end{aligned} \tag{11}$$

Из системы (11) следует, что вероятность безотказной работы резервированной структуры с рассматриваемым типом ВО и первым алгоритмом адаптации вычисляется по формуле

$$W_{2n}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} P_i(t) \quad (1)$$

и при  $n = 3$  может быть записана в виде

$$W_{23}(t) = e^{-3(\lambda + \lambda^*)t} \left\{ 1 - \frac{3\lambda + \lambda^*}{\lambda + 3\lambda^* - 2\lambda_0^*} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{2\lambda_1}{\lambda - \lambda^* + 2\lambda_0^*} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times e^{(\lambda + 3\lambda^* - 2\lambda_0^*)t} \right] + 3\lambda_1 \left[ \frac{1}{\lambda + 3\lambda^* - 2\lambda_0^*} + \frac{e^{2(\lambda + \lambda^*)t}}{\lambda - \lambda^* + 2\lambda_0^*} \right] \right\}. \quad (1)$$

Ввиду громоздкости не приводится выражение для  $W_{25}(t)$  вычисляемое по формуле

$$W_{25}(t) = \sum_{i=0}^4 P_i(t). \quad (1)$$

Составив аналогичным образом систему дифференциальных уравнений для второго варианта графа (рис. 2, б), нетрудно найти соответствующие вероятности безотказной работы  $W_{23}(t)$  для ВО с  $n = 3$  и  $W_{25}(t)$  для ВО с  $n = 5$ , отличающиеся от выражений для  $W_{23}(t)$  и  $W_{25}(t)$  лишь инверсией индексов  $i$  у  $\lambda_i$  и  $\lambda_i^*$ .

Тип алгоритма адаптации, приводящий к различиям значений функции ВО в последнем адаптивном состоянии, является существенным лишь при  $\lambda_0 \neq \lambda_1$  и  $\lambda_0^* \neq \lambda_1^*$ .

2. ВО с *реверсивным ступенчатым изменением порога и весовых коэффициентов входов*. Рассматриваемый ВО (рис. 3, а) является модификацией известного адаптивного ВО [1] и представляет собой многопороговый элемент, весовые коэффициенты всех входов которого и порог под действием управляющих сигналов  $Z$  и  $y$  от устройства адаптации могут реверсивно ступенчато (с шагом равным единице) измеряться в соответствующих диапазонах, например, от  $\max k_i^1 = +m$  до  $\min k_i^1 = 0$  и от  $\max \theta_v = +m(n-1)$  до  $\min \theta_v = 2m$ . При изменении условий функционирования ВО и алгоритма адаптации максимальная корректирующая способность его может быть достигнута в отличных от указанных выше диапазонах измерения  $k_i^1$  и  $\theta_v$ . Реализуемая рассматриваемым адаптивным ВО функция имеет вид

$$f_{3n} = \text{Sg} \left( \sum_{i=1}^n k_i^{(1)} x_i - \theta_v \right), \quad (15)$$

$$k_i^{(1)} \in \{m, m-1, \dots, 1, 0\}, \quad i = 1, 2, \dots, n;$$

где

$$\theta_v \in \{m(n-1), m(n-1)-1, \dots, 2m\}.$$

На каждом шаге вычисления  $k_i^{(l)}$  и  $\theta_j$ , принимают конкретные значения, определяемые предысторией ситуаций на входах ВО.

Будем считать, что одновременное появление ложных сигналов на двух и более входах ВО исключено, т. е. очередной ложный сигнал может появиться на  $i$ -м входе ВО лишь после окончания адаптации, вызванной предыдущим ложным сигналом на  $j$ -м входе.

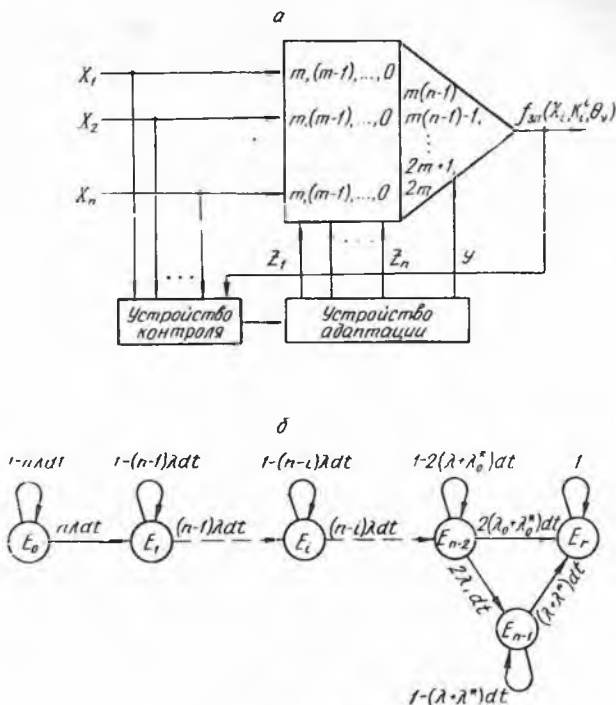


Рис. 3.

Для обеспечения правильной работы такого ВО при выбранной схеме адаптации необходимо, чтобы вероятность правильного сигнала  $f_{3n}$  на выходе ВО была бы намного больше вероятности правильного сигнала на большинстве входов ВО из числа входов, у которых в данный момент  $k_i^{(l)} \neq 0$ .

В соответствии со сказанным алгоритм адаптации рассматриваемого ВО может быть следующим.

В каждом цикле вычисления значения  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) сравниваются со значением  $f_{3n}$ . При рассогласовании сигнала на  $i$ -м входе ВО с сигналом  $f_{3n}$  на его выходе, выявляемом в устройстве контроля, устройство адаптации вырабатывает управляющие сигналы  $Z_i$  и  $y$ . В соответствии с ними снижается на

единицу весовой коэффициент  $i$ -го входа и уменьшается на единицу значение порога, а при совпадении  $x_i$  с  $f_{3n}$  возрастают на единицу порог и соответствующий весовой коэффициент. Реверсивное ступенчатое изменение  $k_i^{(t)}$  и  $\theta_i$  осуществляется в указанных выше пределах. Описанный алгоритм адаптации делает данный ВО нечувствительным к случайным сбоям, если число сбоев, следующих подряд по одному входу, не превышает  $m$  и количество не отключенных при этом входов больше двух. При  $n = 2$  сбоя вида  $(1 \rightarrow 0)$ , а при  $n = 1$  сбоя обоих видов проходят на выход ВО. Следовательно, в зависимости от ситуации на входах ВО его корректирующая способность может принимать два значения:  $\min R = n - 2$  и  $\max R = n - 1$ .

Граф переходов резервированной системы с рассматриваемым адаптивным  $n$ -входовым ВО изображен на рис. 3, б, а соответствующая система дифференциальных уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} P_0'(t) &= -n\lambda P_0(t) \\ P_i'(t) &= (n-i+1)\lambda P_{i-1}(t) - (n-i)\lambda P_i(t) \\ &\quad i = 1, 2, \dots, n-3; \\ P_{n-2}'(t) &= 3\lambda P_{n-3}(t) - 2(\lambda + \lambda_0^*) P_{n-2}(t); \\ P_{n-1}'(t) &= 2\lambda_1 P_{n-2}(t) - (\lambda + \lambda^*) P_{n-1}(t); \\ P_r'(t) &= 2(\lambda_0 + \lambda_0^*) P_{n-2}(t) + (\lambda + \lambda^*) P_{n-1}(t) + P_r(t). \end{aligned} \quad (16)$$

Совместное решение первых  $n$  уравнений системы (16) дает возможность определить вероятность безотказной работы резервированной структуры с  $n$ -входовым адаптивным ВО:

$$W_{3n}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} P_i(t). \quad (17)$$

При  $n = 3$  и начальных условиях  $P_0(0) = 1$ ;  $P_1(0) = P_2(0) = P_r(0) = 0$  уравнение (17) записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} W_{33}(t) &= e^{-3\lambda t} \left\{ 1 - \frac{3\lambda}{\lambda - 2\lambda_0^*} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{2\lambda_1}{\lambda - \lambda^* + 2\lambda_0} \right) e^{(\lambda - 2\lambda_0^*)t} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{6\lambda\lambda_1}{2\lambda - \lambda^*} \left[ \frac{1}{\lambda - 2\lambda_0^*} + \frac{e^{(2\lambda - \lambda^*)t}}{\lambda - \lambda^* + 2\lambda_0} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Аналитическое выражение для

$$W_{35}(t) = \sum_{i=0}^4 P_i(t) \quad (19)$$

с целью сокращения не приводится.

## Исследование эффективности нейроподобных ВО

В связи со сложностью аналитического исследования эффективности рассмотренных нейроподобных ВО было проведено их математическое моделирование на ЦВМ для  $n = 3,5$  в широком диапазоне изменения параметров  $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_0^*, \lambda_1^*, t$ . В результате моделирования получены численные значения введенного критерия эффективности  $\gamma_{jn}(t)$  для различных типов ВО,

согласно которым для наиболее интересных соотношений параметров  $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_0^*$  и  $\lambda_1^*$  на рис. 4—7 приведены кривые, обозначенные следующим образом: 1 —  $\gamma_{13}$ ; 2 —  $\gamma_{15}$ ; 3 —  $\gamma_{23}$ ; 4 —  $\gamma_{25}$ ; 5 —  $\gamma_{23}$ ; 6 —  $\gamma_{25}$ ; 7 —  $\gamma_{33}$ ; 8 —  $\gamma_{35}$ . Черта над цифрой, обозначающей кривую  $\gamma_{jn}$ , указывает на то, что данная кривая получена для

противоположных соотношений между параметрами  $\lambda_0, \lambda_1$  и  $\lambda_0^*, \lambda_1^*$  по сравнению с соответствующей кривой, обозначенной одинаковой цифрой без черты. Для всех кривых в качестве базового параметра выбрано значение  $\lambda = 1 \cdot 10^{-4} 1/\mu$ . Увеличение  $\lambda$  приводит к смещению всех кривых влево, а уменьшение  $\lambda$  — к смещению кривых вправо по оси абсцисс без изменения их относительного расположения.

Из анализа кривых на рис. 4 следует, что при отсутствии сбоев ( $\lambda^* = 0$ ) и равной интенсивности отказов вида ( $0 \rightarrow 1$ ), т. е. при  $\lambda_0 = \lambda_1$ , наибольшей эффективностью при малых значениях  $t$  обладают трехходовые ВО всех рассмотренных типов, а при больших  $t$  — ВО с  $n = 5$ . Пятиходовый неадаптивный ВО малоэффективен в связи с относительно низкой корректирующей способностью.

С повышением интенсивности устойчивых отказов вида ( $1 \rightarrow 0$ ) существенно возрастает эффективность как трех-, так и пятиходовых адаптивных ВО с однонаправленным ступенчатым измерением порога и бинарным изменением весовых коэффициентов, реализующих в последнем адаптивном состоянии функцию ИЛИ (рис. 5). Аналогичный рост эффективности имеет место и у адаптивных ВО с реверсивным ступенчатым изменением порога и весовых коэффициентов входов, но только при увеличении интенсивности устойчивых отказов вида ( $0 \rightarrow 1$ ) (рис. 5). Это вызвано тем, что такие ВО в последнем адаптивном состоянии реализуют функцию И.

Рассмотренные асимметричные потоки устойчивых отказов резко снижают эффективность неадаптивных ВО, имеющих

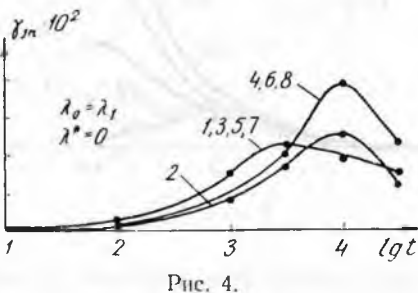


Рис. 4.

симметричные по отношению к обоим видам отказов графы переходов, и адаптивных ВО, реализующих в последнем адаптивном состоянии функции, взаимно-противоположные указанным выше. Отмеченные тенденции еще более усиливаются при увеличении асимметрии потоков устойчивых отказов.

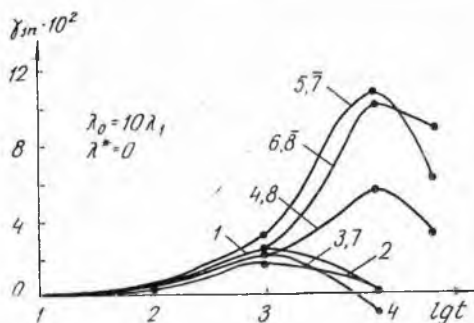


Рис. 5.

что при симметричном потоке по отношению к устойчивым отказам и сбоям наивысшей эффективностью обладают трех- и пяти-входные адаптивные ВО с реверсивным ступенчатым изменением порога и весовых коэффициентов входов, а также неадаптивные

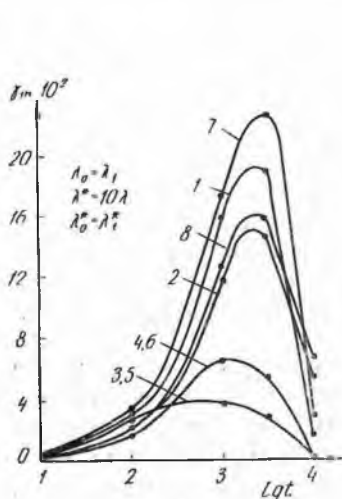


Рис. 6.

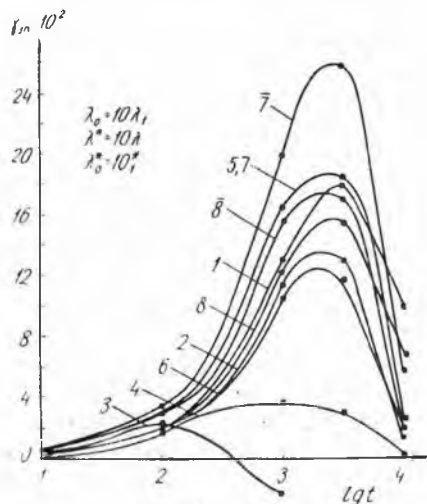


Рис. 7.

ВО. В этом случае рост эффективности таких ВО начинает существенно сказываться даже при малых значениях  $l$ . Поток на входах ВО, асимметричный не только по отношению к устойчивым отказам, но и к сбоям, приводит к дальнейшей дифференциации эффективности рассмотренных типов нейроподобных ВО

(рис. 7). Противоположное изменение асимметрии потока по отношению к отказам и сбоям влечет за собой взаимное смещение кривых 3 и 5, 4 и 6, 7 и  $\bar{7}$ , 8 и  $\bar{8}$ .

Результаты математического моделирования нейроноподобных ВО позволяют выбрать рациональный способ введения избыточности и тип ВО, обеспечивающий заданный уровень надежности при минимальной избыточности для фиксированных значений интенсивностей отказов и сбоев на входах ВО.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. У. Пирс. Построение надежных вычислительных машин. М., «Мир», 1968.
2. А. М. Половко. Основы теории надежности. М., «Наука», 1964.
3. С. М. Доманицкий. Построение надежных логических устройств. М., «Энергия», 1971.

## АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ ПРИРОДА СТРУКТУР ФОРМИРУЮЩЕГОСЯ МЫШЛЕНИЯ

*В. Н. Чудаков*

В настоящее время исследование мышления приобретает функционально-структурную направленность. Формирующееся мышление рассматривается как функциональное взаимодействие, структурирующее отношения организма со средой. Функционально-структурный подход позволяет представить мышление как систему взаимосвязанных структур, составляющих некоторую целостность.

Формирующееся мышление проходит ряд стадий [1]. Каждая из них включает в себя совокупность структур и проходит периоды подготовки (генезиса) и завершения. Период завершения характеризуется прогрессивной организацией структур мыслительных операций. Каждая совокупность структур есть в то же время существование одной и исходная точка формирования следующей стадии. Переход от ранних стадий к более поздним совершается путем особой интеграции: предшествующие структуры оказываются частью последующих. Операциональный характер мышления позволяет выявить общие условия формирования структур операций и подробно описывать такие структуры. Описывать структуру мышления допустимо логико-алгебраическим аппаратом, который дает возможность строить теорию обратимых, устойчивых и подвижных психических (нейронных) структур мышления.

В данной работе рассмотрены алгебраические свойства формирующегося мышления: обратимость, свойства групп и структур порядка, а также структуры мышления формального уровня.

## Аксиоматика формирующегося мышления

Руководствуясь исследованиями в области мышления [1—3], сформулируем ряд аксиом формирующихся структур мышления.

Аксиома 1. *Единицей анализа мышления является структура, обладающая свойствами целостности, трансформации и саморегуляции* [4].

Аксиома 2. *Элементами структур мышления являются операции* [5].

Аксиома 3. *Операции мышления возникают не изолированно, а лишь в совокупности, образуя структуры операций.*

### Обратимость мышления

Из термодинамики известно, что в природе нет обратимых явлений. Исключение представляет мышление человека [6]. Воспроизведение явлений и процессов в результате взаимодействия организма и среды возможно только посредством обратимых процессов мышления. Обратимость мышления характеризуется обратимостью умственных операций. Последние являются обратимыми, если на основании их результатов можно найти операцию, симметричную по отношению к данной, в результате применения которой получаем первоначальный результат [7].

Выясним необходимые и достаточные условия обратимых операций мышления. Пусть дано множество мыслительной продукции  $K$ . Элементами этого множества являются аксиомы, постулаты, посылки, умозаключения, выводы, гипотезы. Обозначим через  $K_1$  множество всех подмножеств множества  $K$ . В результате осмысливания множества  $K$  получим мыслительную продукцию, принадлежащую  $K_1$ . Процесс логического мышления не дает какого-то нового знания  $\notin K$ , но устанавливает различные координации и следствия из основного множества  $K$ . Над множеством  $K_1$  определим множество операций мышления  $M$ . Среди всех операций мышления над множеством  $K_1$  особое место занимают обратимые и инвариантные операции [8]. Инвариантная операция мышления  $\varepsilon \in M$  в соответствие каждому элементу  $k \in K_1$  ставит тот же самый элемент, т. е.  $\varepsilon k = k$ . Пусть  $g \in M$  — произвольная операция мышления. Тогда если для  $g$  существует  $g^{-1}$  такая, что  $gg^{-1}(k) = g^{-1}g(k) = \varepsilon(k) = k$ , то считают, что операция мышления  $g$  обратима, а  $g^{-1}$  обратна, по отношению к  $g$ . Легко показать, что каждая обратимая операция мышления имеет одну обратную.

**Теорема 1.** *Чтобы операция  $g \in M$  над множеством  $K_1$  была обратимой, необходимо и достаточно, чтобы  $g$  была взаимно-однозначным отображением  $K_1$  на себя, т. е. каждый элемент из  $K_1$  имел в  $K_1$  прообраз, и чтобы различные элементы из  $K_1$  переводились операцией мышления  $g$  в различные элементы мыслительной продукции, принадлежащие  $K_1$ .*

Доказательство. *Необходимость.* Пусть  $g$  — обратимая операция, т. е. имеется обратная операция  $g^{-1}$ :

$$gg^{-1} = g^{-1}g = \varepsilon. \quad (1)$$

Возьмем произвольное  $k \in K_1$  и пусть

$$g^{-1}k = \tilde{k}. \quad (2)$$

Воздействуя операцией  $g$  на (2), получаем  $gg^{-1}k = g\tilde{k}$ ;

$$\varepsilon k = g\tilde{k}; \quad k = g\tilde{k}.$$

Каждый элемент  $k$  мыслительной продукции из  $K_1$  является образом некоторого элемента  $\tilde{k} \in K_1$ . С другой стороны, пусть  $k_1$  и  $k_2$  переводятся в один и тот же элемент  $gk_1 = gk_2$ . Тогда, действуя операцией  $g^{-1}$ , получим  $k_1 = k_2$ . Следовательно, каждый элемент из  $K_1$  имеет в  $K_1$  один прообраз.

*Достаточность.* Пусть для  $k \in K_1$  имеется только один  $\tilde{k}$ , для которого

$$gk = \tilde{k}. \quad (3)$$

Обозначим операцию мышления  $g_1$ , переводящую  $\tilde{k}$  в  $k$  (в силу предположенной взаимной однозначности), через

$$g_1\tilde{k} = k. \quad (4)$$

Воздействуя  $g$  на (4) и пользуясь (3), получаем

$$gg_1\tilde{k} = gk = \tilde{k},$$

откуда  $gg_1 = \varepsilon$ . Аналогично получим  $g_1g = \varepsilon$ . Следовательно,  $g_1$  — искомая обратная операция, т. е.  $g$  — обратима.

Процесс логического мышления раскрывает

**Теорема 2.** *Чтобы процесс мышления был логическим, необходима и достаточна его обратимость.*

Доказательство. *Необходимость.* Под преобразованием мышления условимся понимать совокупность операций, принадлежащих  $M$ . Пусть преобразование мышления — логическое и пусть  $g_1 \in M$ ,  $k \in K_1$ . Тогда

$$g_1(k) = \tilde{k}, \quad (5)$$

где  $\tilde{k} \in K_1$ .

Так как процесс логический, его можно осуществить в обратном направлении и прийти к исходному элементу:

$$g_2\tilde{k} = k. \quad (6)$$

Подставляя (5) в (6), получаем  $g_2 g_1(k) = k$ , иначе  $g_2 g_1 = \varepsilon$ , или  $g_1 = g_2^{-1}$ . Следовательно, логическое преобразование мышления обратимо.

*Достаточность.* Пусть преобразование мышления обратимо, т. е.  $g$  имеет обратное  $g^{-1}$ . Это означает однозначность результата преобразования мышления  $g_1$ . Применив обратное преобразование, придем к исходному результату, а это и определяет логическое мышление.

Обратимость — это специфическая особенность мышления, которая определяется способностью симметричных преобразований мышления объединяться в пары. Каждое преобразование мышления такой пары, если оно может начаться вслед за симметричным ему преобразованием, способно восстановить исходное положение. Обратимость преобразования мышления позволяет уравнивать всю систему мыслительных актов, а стремление к уравниванию данной системы может рассматриваться как одна из движущих сил мыслительной деятельности. Обратимость операций в структурах мышления связана с инвариантами в них. Возрастание обратимости операциональных структур мышления характеризует прежде всего возрастающую инвариантность.

Существуют две формы обратимости: инверсия (отрицание) и реципрокность (взаимность) [5]. Первая из них характеризуется тем, что применение последовательно прямой и обратной операций к результату мышления не меняет последнего. Инверсия дает тождественное преобразование. Вторая форма обратимости характеризуется тем, что использование прямой и реципрокной операций порождает отношение эквивалентности. Например,  $(A \leq B) + (A \geq B) = (A = B)$ . Реципрокность меняет порядок в операциях упорядоченности [2].

Таким образом, инверсия является формой обратимости, которая относится к операциям над классами, в то время как реципрокность — это форма обратимости, относящаяся к операциям над отношениями.

На уровне конкретных операций две формы обратимости обуславливают два типа простейших структур мышления. Ниже будет показано, что только на уровне структур мышления формального уровня происходит синтез двух форм обратимости.

### Алгебраические свойства структур мышления

Первым алгебраическим свойством формирующегося мышления является ассоциативность операций. Пусть  $g_1, g_2, g_3 \in M$ . Тогда для них выполняется  $g_1(g_2 g_3) = (g_1 g_2) g_3$ . Свойство ассоциативности в общем случае означает суперпозицию операций мышления. Логическое мышление всегда сохраняет способность к отклонениям, и результат, полученный различными путями, остается одним и тем же. Множество операций  $M$  со свойством

ассоциативности и заданным на нем умножением  $*$ , образует полугруппу. Полугруппы структур мышления описывают общие необратимые процессы мышления. Такие структуры характерны для восприятия и наглядного мышления [9].

С возникновением первой формы обратимости возникают новые алгебраические свойства структур мышления. Алгебраические структуры (а именно — группы) соответствуют операционным механизмам мышления [5]. Они обусловлены первой формой обратимости.

**Теорема 3.** *Для того чтобы полугруппа операций мышления  $M$  была группой, необходимо и достаточно, чтобы  $M$  обладала тождественной операцией  $\varepsilon$  и чтобы каждый элемент  $g \in M$  имел обратный. Другими словами, мышление должно обладать первой формой обратимости.*

*Доказательство.*

*Необходимость.* Пусть  $M$  — группа. Возьмем в  $M$  некоторый элемент  $g \in M$ . В  $M$  должны найтись такие  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$ , что  $\varepsilon_1 g = g$  и  $g \varepsilon_2 = g$ . Пусть  $\tilde{g}$  — произвольная операция  $M$ . Тогда в  $M$  существуют такие  $x$  и  $y$ , что  $xg = \tilde{g}$  и  $gy = \tilde{g}$ . Так как  $\varepsilon_1 \tilde{g} = \varepsilon_1 gy = gy = \tilde{g}$  и  $g \varepsilon_2 = xg \varepsilon_2 = xg = \tilde{g}$ , то  $\varepsilon_1$  оказывается левой тождественной операцией  $\in M$ , а  $\varepsilon_2$  — правой. Отсюда вытекает, что  $\varepsilon_1 \varepsilon_2 = \varepsilon_2$ ;  $\varepsilon_1 \varepsilon_2 = \varepsilon_1$ . Следовательно,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$  и  $\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2$ .

Таким образом, мы показали существование тождественной операции на  $M$ . Но, согласно свойству тождественной операции, каждый элемент из  $M$  имеет обратный.

*Достаточность.* Пусть в полугруппе  $M$  с тождественной операцией  $\varepsilon$  каждый элемент имеет обратный. Тогда для любых  $g_1, g_2 \in M$  имеют место  $(g_2 g_1^{-1}) g_1 = g_2 \varepsilon = g_2$  и  $g_1 (g_1^{-1}, g_2) = \varepsilon g_2 = g_2$ .

Следовательно,  $M$  является группой.

На языке мыслительных действий четыре свойства групп означают следующее.

1. Свойство композиции характеризует координацию двух систем операций, которая представляет собой новую структуру, присоединяемую к предыдущим. Для каждого  $g_1$  и  $g_2$  выполняется  $g_1 g_2 = g_3$  ( $g_1, g_2, g_3 \in M$ ).

2. Свойство ассоциативности

$$(g_1 g_2) g_3 = g_1 (g_2 g_3) \quad (g_1, g_2, g_3 \in M)$$

характеризует такой процесс мышления, при котором к одному и тому же результату можно прийти различными путями.

3. Свойство обратимости характеризуется тем, что процесс мышления может совершаться в двух направлениях. Для любого  $g$  существует  $g^{-1}$  такой, что  $gg^{-1} = g^{-1}g = \varepsilon$  ( $gg^{-1} \in M$ ).

4. Свойство идентичности характеризует инвариантные преобразования [2]  $\varepsilon g_1 = g_1, g_1 \varepsilon = g_1$  или  $g_1 (gg^{-1}) = g_1$  ( $\varepsilon, g_1, g$ ,

$g^{-1} \in M$ ). При возвращении к исходному результату находим его неизменным.

5. Если в группе  $M$  выполняется коммутативное свойство, то оно характеризует независимость преобразований мышления.

Таким образом, группа есть символический перевод некоторых определенных фундаментальных свойств мышления. Поскольку собственные преобразования группы всегда связаны с определенными инвариантами, то группа строится параллельно построению инвариантов, к ней относящихся. При этом заметим, что первоначальной необратимости операций мышления соответствует отсутствие понятий сохранения и инвариантов, а появлению обратимых структур отвечают понятия сохранения и инвариантов. Пока имеется необратимость мысли, нельзя получить понятие постоянства (сохранение совокупности в случае изменения конфигурации; соблюдение эквивалентности между двумя соответственными совокупностями, когда одни элементы рассматриваются с точки зрения других, не представляя больше оптического соответствия [2]. Строение первых предметных обратимых структур операций фактически влечет за собой переработку соответствующих понятий постоянства.

Важно отметить, что инвариант группы преобразований в структуре мышления является знанием о самом объекте, о его собственных свойствах, не зависящих от той или иной системы отсчета, в которой они обнаруживают эти свойства.

Следующее важное свойство структур мышления — порядок. Аксиома теории множеств, заключающаяся в том, что всякое множество можно упорядочить, выражает фундаментальное свойство мышления. Порядок имеет свойства рефлексивности, антисимметричности и транзитивности [10].

На языке мыслительных операций эти свойства заключаются в следующем. Свойство транзитивности операций мышления состоит в объединении последовательности операций в одно целое. Свойство рефлексивности означает отношение операции к самой себе. Асимметричность позволяет отделить симметричные операции мышления.

На частично упорядоченном множестве  $S$  операций мышления строятся структуры порядка, удовлетворяющие следующим свойствам:

1) для каждой пары операций  $a, b \in S$  существует  $c = a \cap b$  такой, что  $c \leq a$  и  $c \leq b$ ;

2) для каждой пары элементов  $a, b \in S$  существует  $d = a \cup b$  такой, что  $d \geq a$  и  $d \geq b$ .

3) множество  $S$  имеет  $\sup \{S\}$  и  $\inf \{S\}$ .

4) существует вторая форма обратимости (из  $a \leq b = a \geq b$  следует  $a = b$ ).

Важным свойством мышления является его ориентировка на потенциально возможное, гипотетическое. Такая ориентировка проявляется в склонности человека подвергать исследованию

все мыслимые возможности посредством комбинаторного анализа переменных факторов задачи. В результате такого анализа человек сначала составляет познавательную картину существующих в данном случае возможностей; следующий шаг заключается в определении с помощью наблюдений и эксперимента тех мыслимых возможностей, которые реально имеют место, а также в логическом умозаключении на основании полученной информации о причинной структуре системы. Эта сетка гипотетических возможностей, которую человек создает посредством метода комбинаторных операций, и представляет собой структуру порядка.

Исследуем эти комбинаторные операции. Дается задача следующего типа: определить причинную структуру, обуславливающую появление или непоявление  $A$  некоторого явления  $X$ . Предположим, что ситуация включает несколько переменных факторов, роль которых как возможных причин должна быть изучена. Обозначим эти факторы как  $B, C, D, \dots$ , если они связаны с появлением  $X$ , и  $B', C', D', \dots$ , когда они объясняются его отсутствием. Задача решается следующим образом. Образуются ассоциации типа  $A \times B, A \times B', \dots$  — результаты установления отношений между предложениями. Они представляют собой не действительные, наблюдаемые явления, а гипотетические утверждения или формулировки возможностей. Так,  $A \times B$  — подлежащая проверке на опыте гипотеза о том, что  $X$  может происходить при наличии  $B$ . Итак, рассматриваются все различные комбинации возможностей. Поскольку операции разветвляются между несколькими предложениями, то можно применить символику математической логики. При решении задачи человек мысленно образует различные комбинации классов еще до начала эксперимента как подлежащие эмпирической проверке. Затем составляются все возможные комбинации этих ассоциаций.

Пусть имеются четыре основные ассоциации  $A \times B, A \times B', A' \times B$  и  $A' \times B'$ . Обозначим их новыми символами  $p \wedge q, p \wedge \bar{q}, \bar{p} \wedge q, \bar{p} \wedge \bar{q}$ .

Получаем 16 различных возможных комбинаций этих ассоциаций:

$$1) 0 \rightarrow (p \wedge q) \vee (p \wedge \bar{q}) \vee (\bar{p} \wedge q) \vee (\bar{p} \wedge \bar{q});$$

$$2) a \rightarrow (p \wedge q);$$

$$3) b \rightarrow (p \wedge \bar{q});$$

$$4) c \rightarrow (\bar{p} \wedge q);$$

$$5) d \rightarrow (\bar{p} \wedge \bar{q});$$

$$6) a + b \rightarrow (p \wedge q) \vee (p \wedge \bar{q});$$

$\vdots$   
 $\vdots$   
 $\vdots$   
 $\vdots$   
 $\vdots$   
 $\vdots$

$$16) a + b + c + d \rightarrow (p \vee q) \vee (p \wedge \bar{q}) \vee (\bar{p} \wedge q) \vee (\bar{p} \wedge \bar{q}).$$

Такая совокупность всех возможных операций является структурой порядка. Сами комбинации представляют собой элементы структуры порядка, т. е. операция  $(\wedge)$  дает для каждой пары единственный наибольший нижний предел, а  $(\vee)$  — наименьший верхний предел.

Структура порядка является результатом функционирования трех конкретно-операциональных группировок [1].

Операции, обладающие структурой порядка, гарантируют исследователю обзор потенциальных возможностей всех возможных комбинаций в виде структуры порядка, что само по себе есть только инструмент мышления для анализа причинных ситуаций. Пользуясь совокупностью всех возможностей, человек проверяет, какие из них реально имеют место, и на этой основе выводит точное заключение о взаимоотношениях причины и следствия.

Таким образом, структуры порядка также являются фундаментальными механизмами мышления как структуры групп.

### Структура мышления формального уровня

Мы выяснили, что групповое свойство структур мышления обусловлено первой формой обратимости, а свойства структур порядка — второй. Этот результат сформулируем как

**Обобщение.** Для того чтобы мышление обладало свойствами групп и структур порядка, необходимо и достаточно существование двух форм обратимости мышления — инверсии и взаимности.

Мышление, обладающее свойствами групп и структур порядка, образует структуры формального уровня [5]. Мышление формального уровня формируется на базе элементарных мыслительных структур — классификации структуры отношений, структуры соответствий. Оно обладает следующими признаками:

1. Операциями формальных мыслительных структур являются операции над преобразованиями.

2. На стадии формального мышления появляется способность гипотетико-дедуктивного мышления. Его можно назвать теоретическим (или аксиоматическим). В основе теоретического мышления лежит гипотетико-дедуктивное рассуждение, которое создает возможность принять любые данные как нечто чисто гипотетическое и строить рассуждение относительно их.

3. Для проверки или установления действительных отношений между объектами мышление более не движется от актуального к теоретическому, а сразу начинается с теории.

Руководствуясь экспериментальным материалом образования структур мышления формального уровня, Ж. Пиаже выявил четыре операции преобразований в таких структурах [2, 588]:

1) тождественное —  $I$ , ничего не меняющее в элементарной структуре;

2) обращение, или преобразование отрицания —  $N$ , являющееся преобразованием двойственности, т. е. оно меняет операцию на ее

дополняющую, а члены элементарной структуры — на противоположные:

3) взаимность (или преобразование реципрокности) —  $R$ , сохраняющее операцию неизменной, но меняющее члены структуры на обратные;

4) преобразование корреляции —  $C$ , заменяющее операцию на ее дополняющую без затрагивания членов предложения. Эти операции преобразований над элементарными мыслительными структурами образуют структуру группы и структуру порядка.

**Теорема 4.** *Операции преобразований  $I, N, R, C$  образуют группу.*

Доказательство приведено в [5].

**Теорема 5.** *Операции преобразования  $I, N, R, C$  образуют структуру порядка.*

Доказательство. Множество  $\{I, N, R, C\}$  является частично упорядоченным, т. е. на нем можно задать порядок  $\leq$ , обладающий свойствами рефлексивности, антисимметричности и транзитивности.

Множество  $\{I, N, R, C\}$  обладает нижней точной гранью  $I$  и верхней  $N$ . Действительно, операция преобразования  $I$  ничего не меняет в элементарной структуре, в то время как  $N$  меняет ее полностью. Следовательно, множество операций преобразований образует структуру порядка.

Таким образом, формирующееся мышление может образовывать структуры алгебраического типа — группы и структуры порядка. Алгебраические свойства структур мышления обусловлены двумя формами обратимости. Структуры мышления формального уровня обладают свойствами групп и структур порядка одновременно. Возникает возможность дальнейшего применения теории инвариантов, в частности, теории групп и структур порядка, к изучению мышления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Х. Флейвелл. Генетическая психология Ж. Пиаже. М., «Прогресс», 1967.
2. Ж. Пиаже. Избранные психологические произведения. М., «Просвещение», 1969.
3. Ж. Пиаже. Роль действия в формировании мышления. «Вопросы психологии», вып. 6. М., 1965.
4. J. Piaget. Le structuralisme. Paris, Presses universitaires de France, 1968.
5. Ж. Пиаже. Структуры математические и операторные структуры мышления. Сб. «Преподавание математики». М., — Л., Учпедгиз, 1960.
6. Н. И. Кобозев. Ж. физ. хим., 40, 784 (1966).
7. Ж. Пиаже. Речь и мышление ребенка. М. — Л., Учпедгиз, 1932.
8. А. И. Малъцев. Основы линейной алгебры. М., «Наука», 1970.
9. Е. С. Ляпин. Полугруппы. М., Физматгиз, 1960.
10. П. А. Скорняков. Элементы теории структур. М., Физматгиз, 1970.
11. Ж. Пиаже, Б. Инельдер. Генезис элементарных логических структур. М., ИЛ, 1963.

## ВВЕДЕНИЕ МЕТРИКИ В ПОЛЕ ЗРЕНИЯ

*Ю. П. Шабанов-Кушнарченко, И. В. Шульгин,  
Б. К. Лопатченко*

Настоящая статья является продолжением работы [1], в которой рассматривались метрические свойства поля зрения человека, которое при монокулярном восприятии можно представить в виде множества точек зрительного ощущения на плоскости. После зрения можно рассматривать как абелеву группу.

Покажем, что его можно рассматривать и как линейное нормированное пространство.

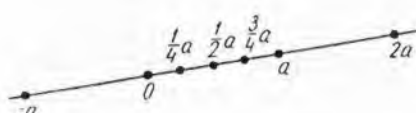


Рис. 1.

Построим операцию умножения  $\lambda a$  точек  $a, b, c, \dots$  поля зрения на вещественные числа  $\lambda$  и докажем выполнение следующих свойств этой операции [2, 58]:

- 1)  $\lambda(\mu a) = (\lambda\mu) a$  — закон ассоциативности умножения;
  - 2)  $\lambda(a + b) = \lambda a + \lambda b$
  - 3)  $(\lambda + \mu) a = \lambda a + \mu a$
  - 4)  $1 \cdot a = a$
- законы дистрибутивности умножения;

Для выполнения этих условий введем умножение точек поля зрения на вещественные числа, используя те операции деления интервалов пополам —  $S$  и  $T$ , которые способен производить испытуемый [1].

Пусть имеются точка фиксации  $x \equiv 0$  и произвольная  $a$ . По определению будем считать, что при умножении  $a$  на единицу получим ту же самую точку  $a$  (рис. 1). Затем после деления интервала  $0a$  пополам получаем точку, которую обозначим  $\frac{1}{2}a$ . Таким образом, вводим умножение на  $\frac{1}{2}$ . Если теперь разделить интервал  $\frac{1}{2}a$  пополам, получим точку  $\frac{3}{4}a$ , т. е. вводим умножение на  $\frac{3}{4}$ . Деление интервала между точками  $0$  и  $\frac{1}{2}a$  даст точку  $\frac{1}{4}a$  и т. д. При внешнем делении пополам интервала  $0a$  получаем точку  $2a$ , т. е. вводим умножение на два.

Если внешнее деление производится в левую сторону от  $0$ , имеем точку  $(-a)$  и т. д.

Таким образом получаем прямую линию, точки на которой являются произведениями некоторых чисел. При подобном определении эти числа оказываются двончно-рациональными вида  $\frac{k}{2^n}$ , где  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ). Чтобы определение умножения точек на двончно-рациональные числа было

корректным, необходимо доказать, что результат умножения точки на двоично-рациональное число  $\frac{k}{2^n}$  не зависит от конкретного способа получения этой точки, так как ее можно получить, деля интервалы пополам в различной последовательности. Доказательством служит

**Теорема 1.** Если  $G$  — абелева группа, то она обладает следующим специальным свойством: для всякого  $a \in G$  существует и единственно  $x$ , определенное как

$$x + x = a. \quad (1)$$

**Доказательство.** Положим, что  $x = S(0, a)$ . Тогда  $T(0, x) = a$ . В этом случае  $x + x = T(0, S(x, x))$ . Учитывая, что  $S(x, x) = x$  [1], получим  $x + x = T(0, x) = a$ .

Для доказательства единственности  $x$  положим обратное:  $x + x = a$ , т. е.  $T(0, S(x, x)) = a$ . Тогда  $x + x = T(0, x) = a$ , т. е.  $x = S(0, a)$ , что и требовалось доказать.

**Теорема 2.** Если  $G$  — абелева группа, удовлетворяющая условию (1), то  $G$  — это  $r_2$  модуль, где  $r_2$  — множество двоично-рациональных чисел, причем  $x = \frac{a}{2}$  (т. е. в этом случае определено умножение элементов  $a, b \in G$  на  $\alpha, \beta \in r_2$  обладающее свойствами 1) — 4)).

**Доказательство.** Сначала на основании теоремы 1 примем для  $z \in G$ , что  $z + z = 0$ , откуда  $z = 0$ . Иными словами, если

$$2z = 0,$$

то

$$z = 0. \quad (2)$$

Пусть  $x = Pa$ . В силу (1)  $2Pa = a$ . Сформулируем утверждение об аддитивности операции  $P$ :

$$P(a + b) = Pa + Pb. \quad (3)$$

Действительно,  $Pa + Pa = a$ ;  $Pb + Pb = b$ . Сложим эти равенства:  $(Pa + Pb) + (Pa + Pb) = a + b$ . Но, по определению  $P$ ,  $P(a + b) + P(a + b) = a + b$ . Из двух почленных равенств вытекает, что  $(Pa + Pb) + (Pa + Pb) = P(a + b) + P(a + b)$  или  $2[(Pa + Pb) - P(a + b)] = 0$ . На основании (2),  $(Pa + Pb) - P(a + b) = 0$ , т. е.  $P(a + b) = Pa + Pb$ , что и требовалось доказать.

Отсюда следует, что  $P$  — это эндоморфизм. Следовательно, и  $P^n$  — эндоморфизм.

Оператор  $P^n$  обладает свойствами аддитивности

$$P^n(a + b) = P^n a + P^n b \quad (n = 1, 2, 3 \dots) \quad (4)$$

и однородности

$$k(P^n a) = P^n(ka) \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots). \quad (5)$$

Для дальнейшего доказательства пусть  $\lambda \in r_2$ . Представим  $\lambda$  в виде двоично-рационального числа  $\lambda = \frac{k}{2^n}$ . Определим умножение элемента  $a \in G$  на двоично-рациональное число, положив

$$\lambda a = kP^n a. \quad (6)$$

Покажем, что это определение корректно, а именно: из равенства коэффициентов  $\lambda$  должно следовать равенство произведений этих коэффициентов на элемент  $a \in G$ , т. е. если  $\frac{k_1}{2^{n_1}} = \frac{k_2}{2^{n_2}}$ , то  $k_1 P^{n_1} a = k_2 P^{n_2} a$ . Для этого достаточно рассмотреть случай  $n_2 - n_1 = 1$ . Иными словами, достаточно показать, что при этом

$$2kP^{n+1}a = kP^n a, \quad (7)$$

т. е. все остальные случаи также можно свести к  $n_k - n_{k-1} = 1$ .

Пусть правой частью равенства (7) является  $kP^n a = c$ . Тогда его левая часть с учетом свойств (1) и (5) запишется в виде

$$2kP^{n+1}a = 2k[P(P^n a)] = 2P[k(P^n a)] = 2Pc = c.$$

Мы показали, что левые и правые части равенства (7) одинаковы, т. е. определение умножения на двоично-рациональное число корректно.

Положим для удобства дальнейшего доказательства, что  $n_1 = n_2 = n$ . Тогда  $\lambda_1, \lambda_2 \in r_2$  можно записать как  $\lambda_1 = \frac{k_1}{2^n}$ ;  $\lambda_2 = \frac{k_2}{2^n}$ . Свойство ассоциативности умножения запишем следующим образом:

$$(\lambda_1 \lambda_2) a = \frac{k_1 k_2}{2^{n+n}} a.$$

С учетом (6)

$$(\lambda_1 \lambda_2) a = k_1 k_2 P^{n+n} a = k_1 k_2 P^n P^n a = k_1 P^n (k_2 P^n a) = \lambda_1 (\lambda_2 a).$$

Свойства дистрибутивности умножения с учетом (6) имеют вид

$$(\lambda_1 + \lambda_2) a = \frac{k_1 + k_2}{2^n} a = (k_1 + k_2) P^n a = k_1 P^n a + k_2 P^n a = \lambda_1 a + \lambda_2 a;$$

$$\lambda (a + b) = \frac{k}{2^n} (a + b) = k P^n (a + b) = k (P^n a + P^n b) =$$

$$= k P^n a + k P^n b = \frac{k}{2^n} a + \frac{k}{2^n} b = \lambda a + \lambda b.$$

Таким образом, определено умножение элементов  $a, b \in G$  на  $\alpha, \beta \in r_2$ , обладающее свойствами ассоциативности и дистрибутивности. Выполнение условия 4) вытекает из определения введенного нами умножения на двоично-рациональное число.

В итоге все аксиомы линейного пространства для двоиочно-рациональных чисел выполняются.

Необходимо показать, что эти аксиомы выполняются и для всех вещественных чисел. С этой целью приведем две аксиомы.

Аксиома 1. *Операция сложения точек непрерывна, т. е. если  $a_n \rightarrow a$  и  $b_n \rightarrow b$ , то  $a_n + b_n \rightarrow a + b$ .*

Аксиома 2. *Если последовательность точек  $a_1, a_2, \dots, a_n, \dots$  поля зрения сходится к некоторой точке  $a$  и последовательность двоично-рациональных чисел  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, \dots$  сходится к числу  $\lambda$ , то последовательность точек поля зрения  $\lambda_1 a_1, \lambda_2 a_2, \dots, \lambda_n a_n, \dots$  также сходится, причем положение полученной точки не зависит от выбора конкретных последовательностей чисел и точек.*

Полученную в результате предельного перехода точку обозначим через  $\lambda a$  и примем ее за произведение вещественного числа  $\lambda$  на точку  $a$  поля зрения.

Из аксиом 1, 2, а также из свойств 1) — 4) умножения на двоично-рациональные числа непосредственно следует, что для любых точек  $a, b, c, \dots$  поля зрения определено умножение на вещественные числа. При этом выполняются условия 1) — 4) для вещественных чисел.

В результате приходим к выводу о том, что поле зрения — это вещественное линейное пространство.

Рассмотрим аксиоматическое введение нормы в поле зрения. С этой целью сформулируем следующие аксиомы.

Аксиома 3. *Пусть  $a'$  — некоторая зафиксированная точка поля зрения, не совпадающая с точкой фиксации  $\alpha$  — центром поля зрения. Тогда для любых точек  $a$  и  $b$  найдется единственное вещественное число  $\lambda$  такое, что  $\rho(a, \beta) = \rho(\alpha, \lambda a')$ .*

Отсюда следует, что в качестве субъективного расстояния  $\rho(a, b)$  можно принять функционал  $\lambda(a, b)$ , который удовлетворяет следующим свойствам.

Аксиома 4.  $\lambda(a, b) > 0$ , причем  $\lambda(a, b) = 0$ , если  $a = b$  (позитивность).

Аксиома 5.  $\lambda(a, b) = \lambda(b, a)$  (симметрия).

Аксиома 6.  $\lambda(a, b) \leq \lambda(a, c) + \lambda(c, b)$  (неравенство треугольника).

Аксиома 7.  $\lambda(a + c, b + c) = \lambda(a, b)$  (трансляционная инвариантность).

Аксиома 8.  $\lambda(\alpha a, \alpha b) = |\alpha| \lambda(a, b)$  (абсолютная однородность).

Доказано [3, 210], что любой функционал  $\lambda(a, b)$ , удовлетворяющий аксиомам 3—8, порождает единственную норму, определяемую формулой  $\|a\| = \lambda(a, \alpha)$ .

Итак, в поле зрения введено двумерное линейное нормированное пространство.

На основании теоремы об изоморфизме конечномерных линейных нормированных пространств числа измерений  $n$  евклидову  $n$ -мерному пространству [2] приходим к выводу о существовании взаимно-однозначного и взаимно-непрерывного отображения  $\Phi$  поля

зрения на плоскость. Эта проекция будет обладать евклидовой метрикой. Отсюда следует, что математическая модель преобразования точек пространства зрения в их образы в ощущении [1] может быть представлена в виде

$$y = L_0(\rho_e(\Phi(a), \Phi(b)), \rho_e(\Phi(c), \Phi(d))), \quad (8)$$

где  $\rho_e$  — евклидово расстояние на поле зрения в нормальной форме;

$\Phi$  — преобразование исходной формы поля зрения в нормальную.

Таким образом, аксиоматическая теория метрики поля зрения построена.

Для полной завершенности модели метрики поля зрения необходимо найти вид функции  $\Phi$ , преобразующей исходное поле зрения к нормальному виду. Вид оператора  $\Phi$  будет задан, если удастся записать формулы, преобразующие координаты произвольной точки  $A$  на исходном поле зрения  $N$  в координаты точки  $A^*$  на нормальном поле зрения  $E$ , т.е. образ точки  $A^* = \Phi(A)$ .



Рис. 2.

Для удобства выполнения психологических операций будем рассматривать точки на кампиметрической плоскости  $M$ . Затем их легко спроектировать с помощью введенных преобразований точек пространства зрения на исходное поле зрения  $N$  [4].

На кампиметрической плоскости  $M$  введем декартову систему координат  $x, y$ ; на нормальном поле зрения  $E$  — такую же систему  $\xi^*, \eta^*$  (рис. 2, 3).

Пусть  $\xi^* = \varphi_1(x, y)$ ,  $\eta^* = \varphi_2(x, y)$ . Каждая из  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  как функция двух переменных может быть изображена в виде однопараметрического семейства кривых. Для этого на кампиметрической плоскости введем точку  $a_0$  в центре поля зрения с координатами  $(0, 0)$ , являющуюся точкой фиксации, и точку  $a_1$  на оси абсцисс с координатами  $(1, 0)$ , находящуюся от испытуемого, к примеру, на расстоянии  $\approx 10^\circ$  (для точки  $a_1$ , представленной на рис. 2, глаз испытуемого должен находиться на расстоянии 15 см от точки  $a_0$ ). Проекции  $A_0^*$  точки  $a_0$  на плоскость  $E$  и проекции  $A_1^*$  точки  $a_1$  на плоскость  $E$  сообщим те же координаты, т.е.  $A_0^*(0, 0)$ ,  $A_1^*(1, 0)$  (рис. 3).

На плоскости  $E$  вводим точку  $A_2^*(-1, 0)$ . Соответствующую ей точку  $a_2$  на плоскости  $M$  найдем с помощью операции внешнего деления интервала пополам:  $a_2 = T(a_1, a_0)$ . Затем на плоскости  $E$  вводим точку  $A_3^*(0, 1)$ . Соответствующую ей точку  $a_3$  находим из условий

$$\rho(a_0, a_3) = \rho(a_0, a_1);$$

$$\rho(a_2, a_3) = \rho(a_1, a_3).$$

На нормальном поле зрения вводим точку  $A_4^*$  (0, -1). На плоскости  $M$  ей соответствует точка  $a_4$ , которая находится как  $a_4 = T(a_3, a_0)$ .

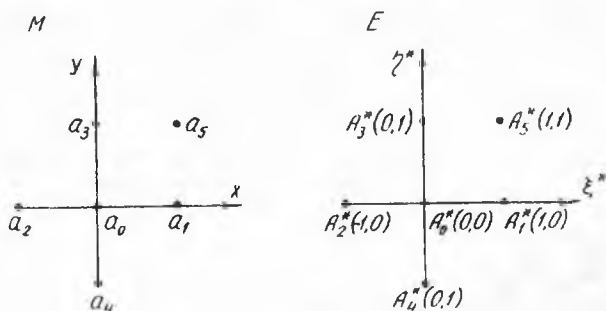


Рис. 3.

На плоскости  $E$  вводим точку  $A_5^*$  (1, 1) =  $A_1^* + A_3^*$ . На кампиметрической плоскости ей соответствует точка  $a_5$ , определяемая следующим образом:

$$a_5 = a_1 + a_3 = T(a_0, S(a_1, a_3)).$$

Аналогичным образом на плоскости  $M$  строим всю координатную сетку, т. е. точки вида  $a_{ij} = a_{i0} + a_{0j} = T(a_{00}, S(a_{i0}, a_{0j}))$ , где  $i, j$  — текущие координаты точек  $a$ .

Соединяя полученные точки плавными линиями, проходящими через точки вида  $a_{i0}$  и  $a_{0j}$ , получим координатную сетку, состоящую из вертикальных и горизонтальных линий соответственно.

На рис. 4 в 18-кратном уменьшении представлена координатная сетка, точки которой определялись с учетом зон нечувствительности, возникающих при выполнении психологических операций сравнения интервалов, а также внутреннего и внешнего деления интервалов пополам.

Как видно из рис. 4, линии, лежащие вне точки фиксации, имеют определенный изгиб.

Аналогичную задачу, связанную со зрительным восприятием прямых линий, выполнял и Г. Гельмгольц [5], а также некоторые другие исследователи [6]. Г. Гельмгольцу удалось, в частности, экспериментальным путем подобрать кривизну находившихся вне точки фиксации линий на кампиметрической плоскости

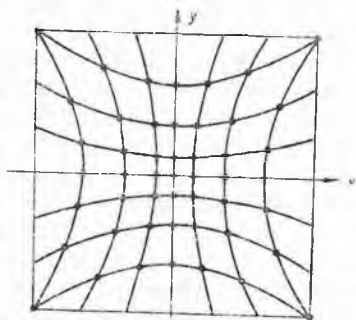


Рис. 4.

таким образом, что они представлялись испытуемому как прямые. В процессе эксперимента Г. Гельмгольц рассматривал одним глазом с расстояния 20 см шахматную доску (рис. 5), которая была увеличена в 14 раз. Квадраты на ней казались ему правильными, а не искаженными. При этом Г. Гельмгольц указывал: «... линию, дающую образ на какой-либо периферической части сетчатки, необходимо делать выпуклой в направлении к точке фиксации для того, чтобы она казалась прямой, и притом тем более выпуклой, чем эксцентричнее она представляется» [7, 599].

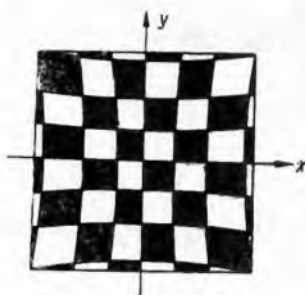


Рис. 5.

Принятая Г. Гельмгольцем методика построения линий, дающих образы прямых линий, отличается от используемой нами, так как мы строим сетку по точкам, используя лишь факты из области сравнения интервалов, деления интервалов, сложения точек и т. д. Авторами данной статьи не использовались такие понятия, как «ощущение прямого угла», «ощущение прямизны», которые применял Гельмгольц, потому что они не фигурируют в аксиомах. Очевидно, эти понятия выходят за пределы построенной нами теории. Но может оказаться, что прямые линии на нормальном поле зрения будут выглядеть психологически прямыми, а прямые углы на плоскости  $E$  также будут казаться прямыми. Сравнение предложенной нами координатной сетки и доски Гельмгольца (рис. 4 и 5) показывает, что линии на доске Гельмгольца изогнуты слабее, хотя оба рисунка при равных условиях воспринимаются с прямыми, а не с изогнутыми квадратами.

Как видно из расчетов указанных диаграмм, зона нечувствительности точек на предложенной нами координатной сетке (особенно периферических точек) в основном даже не достигает соответствующих точек на доске Гельмгольца. Отсюда следует, что расхождения выходят за пределы ошибки опыта.

Почему могли появиться такие расхождения — ведь обе доски характеризуют зрительное восприятие человеком прямых линий? Одна из причин заключается, очевидно, в том, что при периферическом зрении локализация отличается большой неопределенностью и установить действительную степень искривления весьма трудно. В таких случаях человек склонен схематизировать, т. е. утверждать, что линии скорее прямые, чем изогнутые [6]. Кроме того, зона нечувствительности, определенная экспериментально, свидетельствует о том, что не только построенная Гельмгольцем доска субъективно будет выглядеть прямоугольной. На это указывают опыты Кюстера, в которых линии имели больший изгиб, чем у Гельмгольца. По-видимому, результаты,

полученные Кюстером, ближе к нашим. К сожалению, вид доски, экспериментально построенной Кюстером, не удалось установить.

С помощью преобразований (6) [4] перейдем от кампиметрической плоскости  $M$  к исходному полю зрения  $N$ , где полученная нами координатная сетка имеет вид, представленный на рис. 6. Эта сетка дает графическое изображение обратного преобразования:

$$A = \Phi^{-1}(A^*).$$

Из рис. 6 видно, что диаграмма имеет геометрическую форму в виде линий с некоторой кривизной, характеризующей преобразование  $\Phi^{-1}$ . Проекция доски Гельмгольца на исходное поле

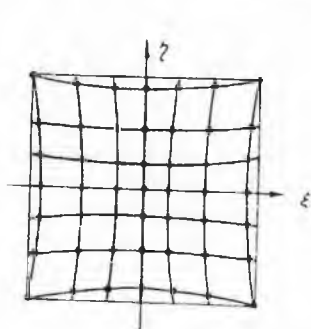


Рис. 6.

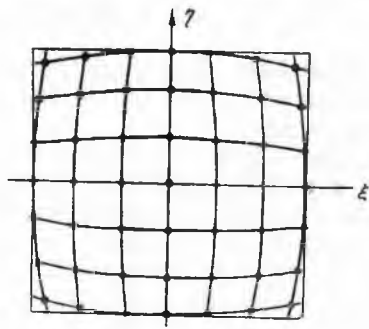


Рис. 7.

зрения также имеет вид линий с некоторой кривизной (рис. 7). Как вытекает из сравнения рис. 6 и 7, диаграммы, полученные авторами данной статьи и Гельмгольцем, различны.

Полученные нами диаграммы завершают построение математической модели метрики поля зрения. Последняя позволяет математически описать конкретное отображение  $\Phi^{-1}$ . В итоге все параметры и функциональные зависимости модели, которые в принципе можно было найти из эксперимента, определены.

Таким образом, введена метрическая структура поля зрения и построена система аксиом, обосновывающая вид отображения  $\Phi$  исходного поля зрения на нормальное. Принятые аксиомы были проверены в экспериментах. Их точность определялась зонами нечувствительности психологических операций, производимых испытуемым. Величины этих зон указаны в работе [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Шулъгин. Исследование метрических свойств поля зрения. Сб. «Проблемы бионики», вып. 9. Изд-во Харьковск. ун-та, 1972.
2. Л. А. Люстерник, В. И. Соболев. Элементы функционального анализа. М., «Наука», 1965.
3. И. М. Глазман, Ю. И. Любич. Конечномерный линейный анализ. М., «Наука», 1969.

4. И. В. Шульгин, Б. В. Пильщиков. Математическое описание преобразования органом зрения человека физического пространства в субъективное поле зрения при монокулярном восприятии. Сб. «Проблемы бионики», вып. 8. Изд-во Харьковск. ун-та, 1972.

5. Н. Helmholtz. Handbuch der physiologischen Optik, 1—3. Hamburg—Leipzig, 1909—1911.

6. Э. Геринг. Пространственное чувство и движения глаза. Руководство к физиологии, т. III, ч. 1. Изд. проф. Германа, 1887.

7. Р. Гебер. Курс физиологии человека. М.-Л., Биомедгиз, 1935.

## ОБ ИЗОМОРФИЗМЕ СТРУКТУР МЫШЛЕНИЯ НЕЙРОННОГО И ПСИХОЛОГИЧЕСКОГО (ОПЕРАЦИОНАЛЬНОГО) УРОВНЕЙ

*В. Н. Чудаков*

Рассмотрим задачу об установлении соответствия структур мышления методами логико-алгебраических структур (алгебраических систем).

У. Мак-Каллок и У. Питтс показали, что различные комбинации нервных связей изоморфны логике пропозициональных предложений [1]. С другой стороны, исследуя формирование детского мышления, Ж. Пиаже показал, что различные операциональные уровни формирующегося мышления соответствуют в пределе логико-алгебраическим структурам — классификационным, структурам порядка групп [2—5]. Он выделил два уровня сформировавшихся структур мышления:

а) конкретный, удовлетворяющий аксиомам группировки, на основании которых строятся структуры классификации порядка и соответствия [2, 5]; б) формальный, удовлетворяющий четырем аксиомам операций преобразования, которые образуют групповую структуру [2].

Определив понятие операции и структуры мышления в нейрофизиологическом и психологическом аспектах, мы установили изоморфизм этих структур мышления на конкретном и формальном уровнях.

### Некоторые понятия и определения

Пусть дано произвольное множество  $A$ , линейное и вполне упорядоченное [6]. Будем считать, что на  $A$  определена  $n$ -арная алгебраическая операция  $F$  (где  $n$  — целое неотрицательное число), если любая упорядоченная система из  $n$  элементов  $a_1, a_2, \dots, a_n \in A$  сопоставлена с однозначно определенным элементом этого же множества  $A$ . Записывается это следующим образом:  $(a_1, a_2, \dots, a_n)F = a_i$ , где  $i = 0, 1, \dots, n$ .

В логике рассматриваются особые множества, элементы которых называются модальностями, или степенями истинности. Множество степеней истинности образует континуум отрезка  $[0, 1]$ , где нуль означает ложь, а единица — истину. В класси-

ческой математической логике это множество состоит из двух элементов  $\{И, Л\}$ , где И — истина, Л — ложь.

Пусть  $A$  — произвольное множество;  $n$ -арная функция  $f$ , определенная на  $A$  со значениями в множестве  $\{И, Л\}$ , называется  $n$ -арным предикатом на  $A$ ;  $n$ -арные предикаты образуются при связывании элементов множества  $A$  с помощью логических символов (связок) [6].

**Определение.** Алгебраической системой называется математический объект  $U = \langle A, \Omega_F, \Omega_P \rangle$ , состоящий из трех множеств:

1)  $A$  — множества произвольной природы; его еще называют основным;

2)  $\Omega_F = \{F_0, F_1, F_2, \dots, F_n\}$  — множества операций, определенных на  $A$ ;

3)  $\Omega_P = \{P_0, P_1, P_2, \dots, P_n\}$  — множества предикатов, определенных на  $A$ .

Здесь  $F_0$  — нульварная операция — означает просто фиксацию элемента множества  $A$ ;  $P$  — нульварный предикат, характеризующий высказывание;

а) алгебраическая система  $U = \langle A, \Omega_F \rangle$  называется алгебраической структурой;

б) алгебраическая система  $U = \langle A, \Omega_P \rangle$  называется реляционной (или логической) структурой.

Покажем, что логическую структуру (структуру отношений) можно рассматривать как алгебраическую, и наоборот.

**Теорема 1.** Пусть  $A$  — множество произвольной природы. Когда на нем определены  $n$ -арные предикаты и  $n$ -арные операции, между ними можно установить взаимно-однозначное соответствие.

**Доказательство.** Рассмотрим  $n$ -арную операцию на  $A$ . Областью значений этой операции будет подмножество  $A_1$  ( $A_1 \subset A$ )  
Полагая

$$f(a_1, \dots, a_n) = \begin{cases} И, & \text{если } a_1, \dots, a_n \in A_1, \\ Л, & \text{если } a_1, \dots, a_n \notin A_1, \end{cases}$$

где  $a_1, \dots, a_n \in A$ , получаем  $n$ -арный предикат, отвечающий  $n$ -арной операции. В силу определения предиката

$$f(a_1, \dots, a_n) = a_i \{И\},$$

где  $a_i \in A_1$ ,  $0 \leq i \leq n$

Пусть теперь задан  $n$ -арный предикат

$$f(a_1, \dots, a_n) = \begin{cases} И, & \text{если } (a_1, \dots, a_n) \in A_1, \\ Л, & \text{если } (a_1, \dots, a_n) \notin A_1. \end{cases}$$

Тогда на  $A_1$  можно определить  $n$ -арную операцию

$$f(a_1, \dots, a_n) = \begin{cases} a_i, & \text{если } (a_1, \dots, a_n) \in A_1 \{И\}, \\ 0, & \text{если } (a_1, \dots, a_n) \notin A_1 \{Л\}, \end{cases}$$

где  $a_1, \dots, a_n \in A$ ;  $a_i \in A_1$ .

Таким образом, мы установили взаимно-однозначное соответствие между операциями и предикатами.

Следствие. *Логическую структуру  $U = \langle A, \Omega_P \rangle$  можно рассматривать как алгебраическую, и наоборот.*

Согласно теореме 1, структуры мышления можно представить либо логическими, либо алгебраическими.

Руководствуясь положениями работы [7, 1727], сформулируем понятие нейронной операции и нейронной структуры. Под нейронной операцией будем понимать такой комплекс физико-химических и соответственно физиологических актов в мозге, которые отвечают возникновению в мышлении некоторой единицы мыслительной операции.

Под нейронной структурой будем понимать множество нейронов (или их подмножеств) с заданными на них нейронными операциями и удовлетворяющих некоторой системе аксиом, которые выражают их свойства (аксиомы берутся из данных теоретической нейрофизиологии) [1, 8].

Если для некоторой нейронной структуры ее система аксиом совпадает с системой аксиом некоторой математической структуры, то можно говорить о математической нейронной структуре и применять теоремы, а также следствия данной математической структуры для анализа и объяснения нейронных структур.

Формирование мыслительных структур и мыслительных операций описано Ж. Пиаже [2, 3, 8].

Под операцией понимаются интериоризированные действия, ставшие обратимыми и сгруппированные в системы, которые подчиняются своим законам композиции. Операции связаны в форму структурированного целого.

Источником анализа структур мышления являются логико-алгебраические структуры, которые, с одной стороны, — заимствованные из психологии мышления представления об операциях, их системах и равновесиях, а с другой — математические принципы исследования структурных образований типа полугрупп, групп, решетки, алгебраических систем и т. д.

Логико-алгебраические структуры представляют собой как бы аксиоматику операциональных и нейронных структур мышления, а нейропсихология изучает реальное функционирование этих структур. Логико-алгебраические структуры мышления должны удовлетворять двум требованиям:

- а) математической значимости;
- б) адекватной применимости к данным экспериментальной психологии и нейрофизиологии мышления.

### **Изоморфизм нейронных и операциональных структур мышления конкретного уровня**

Уровень конкретного мышления состоит из множества элементарных операциональных структур (группировок). Обуславливающие установление классификаций объектов и отношений

между ними, они были сформулированы на основании результатов изучения формирующегося мышления ребенка [2, 98]. Данные операциональные структуры подчиняются следующим аксиомам: композиции, обратимости, ассоциативности, инверсии, тавтологии (специального тождества) [4, 234]. Построенные на основании этих аксиом элементарные операциональные структуры мышления образуют всевозможные классификационные структуры и структуры отношений, а также различные элементарные логические структуры [2, 591].

Руководствуясь элементарными мыслительными структурами, подчиняющимися аксиомам конкретного мышления, а также изоморфизмом нейронных структур структурам математической логики, установленным Мак-Каллоком и Питтсом [1], сделаем выводы относительно аксиом нейронных структур.

1. Среди нейронных структур имеются элементарные, которые соответствуют рассмотренным элементарным операциональным структурам;

2. Элементарные нейронные структуры образуют нейронный уровень мышления, соответствующий операциональному (психологическому) уровню конкретного мышления.

Сформулируем аксиомы элементарных нейронных структур (они аналогичны аксиомам элементарных мыслительных структур).

*A<sub>1</sub>. Аксиома композиции. Нейрофизиологически композиция означает возможную координацию нейронных операций.*

*A<sub>2</sub>. Аксиома обратимости нейронных преобразований. Обратимость обуславливает существование прямой и обратной нейронных операций.*

*A<sub>3</sub>. Аксиома ассоциативности. Нейронные структуры сохраняют способность к отклонениям, и результат, получаемый различными путями, остается неизменным.*

*A<sub>4</sub>. Аксиома инверсии. Результаты взаимно погашаются за счет операций возбуждения и торможения.*

*A<sub>5</sub>. Аксиома тавтологии. Тождественные нейронные преобразования взаимозамещаются.*

3. Такие элементарные нейронные структуры, подчиняющиеся аксиомам  $A_1$ — $A_5$ , можно анализировать при помощи алгебраических систем (логико-алгебраических структур).

### Изоморфизм структур мышления формального уровня

Исходя из экспериментальных фактов формирования мышления, Ж. Пиаже показал [4, 5], что на базе элементарных операциональных (мыслительных) структур, соответствующих конкретному мышлению, формируются формальные операциональные структуры, соответствующие группе преобразований Клейна. Выясним сначала сущность формального мышления (формальных мыслительных структур).

1. Элементами формальных мыслительных структур являются уже не непосредственно объекты, отношения, соответствующие элементарным мыслительным структурам, а сами элементарные структуры, т. е. различные высказывания, формулы, пропорциональные функции и т. д.

2. Операциями формальных мыслительных структур являются операции над преобразованиями.

3. На стадии формального мышления появляется способность к гипотетико-дедуктивному мышлению. Возникает возможность широких логических построений. Это мышление можно назвать теоретическим или аксиоматическим. В основе теоретического мышления лежит гипотетико-дедуктивное рассуждение, которое позволяет принять любые данные как нечто чисто гипотетическое и строить рассуждение относительно их.

4. Формальное мышление порождает ряд следствий: для установления (проверки) реальных отношений между объектами мышление более не движется от актуального к теоретическому, а сразу начинается с теории и, строя выводы из возможных положений, ведет к всеобщему синтезу возможного и необходимого [2, 588].

Руководствуясь экспериментальными данными об образовании операциональных структур мышления формального уровня, Ж. Пиаже [5, 24] выявил четыре операции преобразований в таких структурах.

Рассмотрим операции преобразований, определенные на множестве элементарных операциональных структур. Они образуют множество предложений (предложением могут быть и формула, и высказывание, и предикат).

1. Тождественное преобразование  $I$  ничего не меняет в предложении (оставляет операцию неизменной). Например, дано предложение  $a \vee b$ . Тогда  $I(a \vee b) = a \vee b$ , где  $a, b$  — высказывания или формулы [6].

2. Обращение, или преобразование отрицания  $N$ , есть преобразование двойственности, которое меняет операцию на ее дополняющую, а члены предложения — на противоположные. Это преобразование изменяет в предложении все. Например,

$$N(p \wedge q) = \bar{p} \vee \bar{q}; N(\bar{p} \vee \bar{q}) = p \wedge q.$$

3. Взаимность (или преобразование реципрокности)  $R$  оставляет операцию прежней, но члены предложения меняет на обратные. Например,

$$R(p \vee q) = \bar{p} \vee \bar{q}; R(p \supset q) = (\bar{p} \supset \bar{q}).$$

4. Преобразование корреляции  $C$  заменяет операцию на ее дополняющую, не затрагивая членов предложения. Например,

$$C(p \vee q) = p \wedge q; C(p \wedge q) = p \vee q.$$

Как видим, это преобразование отражает известный в теории множеств принцип двойственности [10].

Из 1—4 операций преобразований над элементарными мыслительными структурами вытекает, что они образуют структуру группы. Свойства формальных структур мышления аналогичны свойствам группы и удовлетворяют аксиомам группы. Это легко докажуемо.

На основании соответствия нейронных структур мыслительным или операциональным можно предположить, что формальные нейронные структуры образованы путем задания следующих четырех преобразований над множеством элементарных нейронных структур  $M$ .

1. Преобразования отрицания  $\bar{N}$ , все меняющего в нейронных предложениях. Например,  $a, b \in M$ , где  $a$  и  $b$  — «нейронные высказывания». Тогда применяя  $\bar{N}$ , получим

$$\bar{N}(a \vee b) = \bar{a} \wedge \bar{b}.$$

2. Преобразования взаимности  $\bar{R}$ , которое оставляет без изменения операцию в «нейронном предложении», но меняет члены предложения на противоположные. Например,  $\bar{R}(a \vee b) = \bar{a} \vee \bar{b}$ .

3. Тождественного преобразования  $\bar{I}$ , ничего не меняющего в нейронном предложении.

4. Преобразования корреляции  $\bar{C}$ , которое заменяет операцию в «нейронном предложении» на ее дополняющую, не меняя членов предложения.

Формальные нейронные структуры образуют группу относительно этих операций преобразований и, следовательно, удовлетворяют аксиомам группы. Покажем это.

**Теорема 2.** Пусть имеется множество элементарных нейронных структур  $M$ , на котором задана бинарная операция (\*) и  $M$  является группоидом. Пусть также задано  $N$  — множество мыслительных структур с операцией ( $\cdot$ ), которое является группой относительно преобразований на  $N$ . Элементами группы  $G$  являются  $N, R, C, I$ ;

$$G = G \{N, R, C, I\}.$$

Пусть имеется гомоморфное отображение  $f$  группы на группоид, т. е.

$$f(N \cdot R) = f(N) \cdot f(R),$$

где  $N, R \in G$ ;  $f(N), f(R) \in T$ .

Тогда справедливо утверждение, что группоид  $M$  с операцией ( $\cdot$ ) образует группу относительно четырех преобразований  $T = \{f(N), f(R), f(C), f(I)\}$ , т. е. формальные нейронные структуры образуют группу относительно преобразований

$$f(N), f(R), f(C), f(I).$$

Доказательство. Отображая группу преобразований  $G\{N, C, R, I\}$  при помощи  $f$ , получим

$$f(N) = \tilde{N},$$

$$f(R) = \tilde{R},$$

$$f(C) = \tilde{C},$$

$$f(I) = \tilde{I}.$$

Покажем, что оно подчиняется аксиомам группы. Обозначим множество преобразований через

$$T = T\{\tilde{N}, \tilde{R}, \tilde{C}, \tilde{I}\}.$$

Аксиома замкнутости операции. Возьмем  $f(N \cdot R) = f(N) \cdot f(R) = f(C)$ , т. е.

$$\tilde{C} = f(N) \cdot f(R); \quad (1)$$

$$f(R \cdot C) = f(N) = f(R) \cdot f(C) = \tilde{N}$$

в силу (1), т. е.

$$\tilde{C} = f(R) \cdot f(C)$$

аналогично для остальных.

Аксиома коммутативности

$$\begin{aligned} f(N \cdot R) &= f(N) \cdot f(R) = \tilde{N} \cdot \tilde{R} = f(R \cdot N) = \\ &= f(R) \cdot f(N) = \tilde{R} \cdot \tilde{N} \end{aligned}$$

для остальных доказывается аналогично.

Аксиома тождественного преобразования. Величина  $f(I) = \tilde{I} \in T$  и пусть  $N \in G$ . Тогда  $f(N) = \tilde{N} \in T$  и  $\tilde{I} \cdot \tilde{N} = \tilde{N} \cdot \tilde{I} =$  (согласно аксиоме коммутативности)  $f(I) \cdot f(N) = f(I \cdot N) = f(N) = \tilde{N}$ .

Аксиома существования обратного преобразования. Для  $C$  найдем  $\tilde{C}^{-1}$ . Легко доказать, что  $\tilde{N} \cdot \tilde{R} \cdot \tilde{C} = \tilde{I}$ .

Действительно, пусть  $M$  — множество элементарных нейронных структур (нейронные предложения) и пусть  $\tilde{p}$  и  $\tilde{q} \in M$  — нейронные высказывания — образуют предложения  $\tilde{p} \vee \tilde{q}$ . Тогда в силу того, что  $I = N \cdot R \cdot C$  [5], получим

$$\begin{aligned} \tilde{N} \cdot \tilde{R} \cdot \tilde{C} (\tilde{p} \vee \tilde{q}) &= f(N) \cdot f(R) \cdot f(C) \cdot [f(\tilde{p}) \vee f(\tilde{q})] = \\ &= f[(N \cdot R \cdot C) (\tilde{p} \vee \tilde{q})] = f[I (\tilde{p} \vee \tilde{q})] = \tilde{I} (\tilde{p} \vee \tilde{q}), \end{aligned}$$

(где  $p$  и  $q$  — уже мыслительные структуры и соответствующие им высказывания, формулы и т. д.), т. е.

$$\tilde{N} \cdot \tilde{R} \cdot \tilde{C} = \tilde{I}. \quad (2)$$

Из (2) на основании закона коммутативности получаем

$$\begin{aligned} \tilde{N} \cdot \tilde{R} \cdot \tilde{C} &= \tilde{C} \cdot \tilde{N} \cdot \tilde{R} = \tilde{C} \cdot f(N \cdot R) = \\ &= \tilde{C} \cdot f(C^{-1}) = \tilde{C} \cdot \tilde{C}^{-1} = \tilde{C}^{-1} \cdot \tilde{C} = \tilde{I}. \end{aligned}$$

Аналогично для  $R$ ,  $N$  и  $I$  доказываем, что

$$\begin{aligned} \tilde{R}^{-1} &= f(N) \cdot f(C) = \tilde{N} \cdot \tilde{C}; \\ \tilde{N}^{-1} &= \tilde{R} \cdot \tilde{C}; \\ \tilde{I}^{-1} &= \tilde{I}. \end{aligned}$$

Аксиома ассоциативности преобразований  $\tilde{N}$ ,  $\tilde{R}$ ,  $\tilde{C}$ ,  $\tilde{I}$ . Необходимо доказать, что  $(\tilde{N} \cdot \tilde{R}) \cdot \tilde{C} = \tilde{N} \cdot (\tilde{R} \cdot \tilde{C})$ . Действительно, согласно (1),

$$\begin{aligned} (\tilde{N} \cdot \tilde{R}) \cdot \tilde{C} &= [f(N) \cdot f(R)] \cdot f(C) = [f(N \cdot R)] \cdot f(C) = \\ &= (\text{в силу выполнения аксиомы ассоциативности на множестве } G) \\ f[(N \cdot R) \cdot C] &= f[N \cdot (R \cdot C)] = f(N) \cdot [f(R) \cdot f(C)] = \tilde{N} \cdot (\tilde{R} \cdot \tilde{C}). \end{aligned}$$

Аналогично доказываем ассоциативность других комбинаций элементов, принадлежащих  $T(G)$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. У. Мак-Каллок, У. Питтс. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности. Сб. «Автоматы». М., ИЛ, 1956.
2. Ж. Пиаже. Избранные психологические произведения. М., «Просвещение», 1969.
3. Ж. Пиаже. Роль действия в формировании мышления. «Вопросы психологии», 1965, № 6.
4. Дж. Х. Флейвелл. Генетическая психология Ж. Пиаже. М., «Просвещение», 1967.
5. Ж. Пиаже. Структуры математические и операциональные структуры мышления. Сб. «Преподавание математики», М.—Л., Учпедгиз, 1960.
6. А. И. Мальцев. Алгебраические системы. М. «Наука», 1970.
7. Н. И. Кобозев. Ж. физ. хим., 51, 7 (1967).
8. М. Брейзье. Электрическая активность нервной системы. М., ИЛ, 1965.
9. П. Фресс, Ж. Пиаже. Экспериментальная психология. М., «Прогресс», 1966.
10. Н. Бурбаки. Теория множеств. М., «Мир», 1965.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛИРУЕМОГО ПОДЧЕРКИВАНИЯ КОНТУРОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ

*Е. П. Пуятин, В. Я. Сердюченко*

В системах обработки оптических изображений часто необходимо подчеркивать границы объектов. Такое подчеркивание основывается на добавлении к исходному изображению в местах перепада яркостей некоторого контурного сигнала, величина которого постоянна. Однако подчеркивание таким способом часто недопустимо сильно искажает изображение, делая его либо слишком рельефным, либо размытым, т. е. недостаточно четким. Это приводит к ошибкам при анализе «обработанного» изображения человеком или распознающей системой. Чтобы избежать таких искажений, надо регулировать степень подчеркивания контура в зависимости от величины перепада яркостей: чем он больше, тем меньше должна быть степень подчеркивания, и наоборот. Особый интерес представляет изучение характера регулируемого подчеркивания контура для такой совершенной системы, как орган зрения человека.

В основе свойства органа зрения подчеркивать контуры изображений лежит явление краевого контраста. В работах [1—2] предлагается математическая модель этого явления, полученная из аксиом краевого контраста, достоверность которых доказана экспериментально. Блок-схема модели имеет вид, показанный на рис. 1. Работа блоков модели описывается уравнениями

блок 1

$$V = c \ln B; \quad (1)$$

блок 2

$$T = \int_a^b V(\xi) K(x - \xi) d\xi; \quad (2)$$

блок 3

$$R(x) = V(x) - T(x), \quad (3)$$

блок 4

$$S(x) = \varphi[R(x)]. \quad (4)$$

Входным сигналом модели является  $B(x)$ , пропорциональный яркости зрительной картины. В блоке 2 «размываются» контуры изображения. В блоке 3 сигнал с «размытыми» контурами вычитается из исходного. Блок 4 взаимно-однозначно преобразует  $R$  в выходной сигнал  $S$ , пропорциональный светлоте зрительного ощущения. Конкретная расшифровка этого блока не входит в задачи настоящей работы. Отметим лишь, что благодаря блокам 1 и 4 яркость может преобразовываться в светлоту в соответствии с определенным законом. Так, для диапазона входных яркостей, когда сравнительно точно выполняется закон Вебера—

Фехнера, блок 4 осуществляет просто тождественное преобразование. При другом виде взаимно-однозначного преобразования (например, потенцирования) общая зависимость между яркостью и светлотой может оказаться степенной.

При исследовании моделей выделения контуров изображения в качестве ядер интегрального преобразования (2) использовались различные функции, например, функция Гаусса [3], функции, аппроксимирующие вторую производную от  $\delta$ -функции и некоторые другие [4]. В работе [2] приводятся определяющие

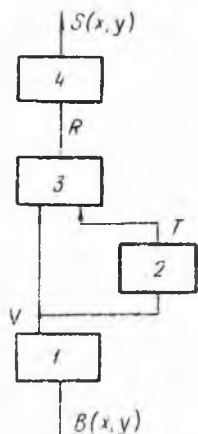


Рис. 1.

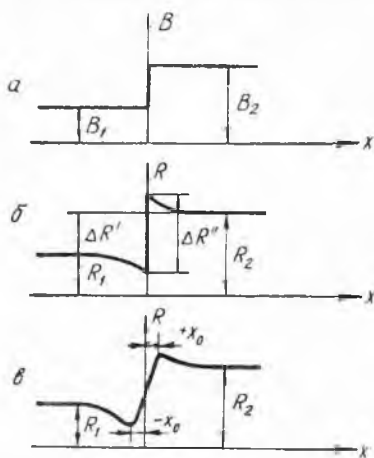


Рис. 2.

вид ядра экспериментальные данные, которые хорошо аппроксимируются выражением вида

$$K(x - \bar{x}) = \frac{k}{2n} e^{-\frac{|x - \bar{x}|}{n}},$$

где  $k$  — параметр степени подчеркивания контура;  $n$  — постоянная, характеризующая «размытие» контура. Экспериментально доказано, что реакция модели с таким ядром на типовые входные сигналы хорошо соответствует характеру распределения светлоты зрительного ощущения [5]. При этом диапазон изменения входных сигналов был незначительным (5—7%) и параметр подчеркивания контура  $k$  принимался постоянным. Дальнейшие эксперименты показали, что в общем случае  $k$  изменяется в зависимости от соотношения яркостей, автоматически регулируя степень подчеркивания контуров изображения. Цель настоящей работы — исследовать параметр  $k$  математической модели и психофизически интерпретировать его изменения.

Чтобы глубже рассмотреть явление краевого контраста, т. е. изучить реакции модели на входные сигналы в виде ступенек,

полосок и т. д., целесообразно перейти от преобразования в блоке 2 модели в виде (2) к более удобному аналитическому выражению. Как показали психофизические опыты, чтобы избежать влияния фона на участок изображения, где проявляется эффект подчеркивания границы, размеры полей разной яркости должны быть достаточно большими (занимать все поле зрения). Опытами, проведенными нами, установлено, что угол зрения, на котором проявляется явление краевого контраста (при расстоянии наблюдения 0,5 м до 0,9 град) на два порядка меньше угла зрения при бинокулярном восприятии. Поэтому в интегральном преобразовании (2) модели естественно перейти к бесконечным пределам. Таким образом, функционирование блока 2 модели с высокой степенью точности может быть описано выражением

$$T = \frac{k}{2n} \int_{-\infty}^{\infty} V(\xi) e^{-\frac{|\xi-x|}{n}} d\xi. \quad (5)$$

Исследуем поведение параметра модели  $k$  в широком диапазоне изменения перепадов яркости.

Прямое определение параметра  $k$  невозможно, так как нельзя непосредственно измерить светлоту зрительного ощущения, соответствующую выходному сигналу модели. Поэтому для решения поставленной задачи будем пользоваться лишь свойством зрительной системы человека фиксировать равенство или неравенство яркостей на полях сравнения.

Воспользуемся входным сигналом типа «скачок яркости»

$$B(x) = \begin{cases} B_1 & \text{при } x \leq 0, \\ B_2 & \text{при } x > 0. \end{cases} \quad (6)$$

Реакция модели на выходе блока 3 будет иметь вид

$$R(x) = \varphi^{-1}(S) = \begin{cases} (1-k)c \ln B_1 - \frac{1}{2} kc \ln \frac{B_2}{B_1} e^{\frac{x}{n}} & \text{при } x \leq 0, \\ (1-k)c \ln B_2 + \frac{1}{2} kc \ln \frac{B_2}{B_1} e^{-\frac{x}{n}} & \text{при } x > 0. \end{cases} \quad (7)$$

Входной сигнал и реакция модели показаны на рис. 2, а, б. Рассмотрим четыре крайних случая функционирования модели:  $x = -\infty$ ;  $x = +\infty$ ;  $x = -0$ ;  $x = +0$ .

Реакции модели, определяемые из (7), запишутся в виде

$$\begin{aligned} R(-\infty) &= (1-k)c \ln B_1 = R_1; \\ R(+\infty) &= (1-k)c \ln B_2 = R_2; \\ R(-0) &= (1-k)c \ln B_1 - \frac{1}{2} kc \ln \frac{B_2}{B_1}; \\ R(+0) &= (1-k)c \ln B_2 + \frac{1}{2} kc \ln \frac{B_2}{B_1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Возьмем постороннее поле сравнения с некоторой яркостью такой, чтобы светлота этого поля равнялась светлоте в точке  $x = +0$ , т. е. чтобы  $S'_3 = S(+0)$ . В силу взаимной однозначности преобразования в блоке 4 это равносильно равенству  $R'_3(\infty) = R(+0)$ .

Аналогично всегда можно подобрать поле сравнения с некоторой яркостью  $B''_3$  такое, что будет иметь место равенство  $R''_3(\infty) = R(-0)$ . Воспользовавшись (8), указанные равенства преобразуем к виду

$$B_2^{(1-\frac{1}{2}k)} = B_3^{(1-k)} B_1^{\frac{1}{2}k}; \quad (9)$$

$$B_1^{(1-\frac{1}{2}k)} = B_3^{n(1-k)} B_2^{\frac{1}{2}k}. \quad (10)$$

Из (9) и (10) получим два выражения для параметра  $k$ :

$$k = \frac{\ln \frac{B_2}{B_3}}{\ln \frac{\sqrt{B_1 B_2}}{B_3}}; \quad k = \frac{\ln \frac{B_1}{B_3}}{\ln \frac{\sqrt{B_2 B_1}}{B_3''}}. \quad (11)$$

Соотношения (11) не зависят от конкретного основания логарифма, постоянной  $s$  и вида ядра преобразования (5). Кроме того, формулы для параметра  $k$  допускают непосредственную экспериментальную проверку, так как величины  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  и  $B_3''$  — яркости и могут быть измерены объективными методами.

Для постановки опытов необходимо взять три поля сравнения с яркостями  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  (или  $B_3''$ ). Смежные поля  $B_1$  и  $B_2$  образуют скачок яркости (рис. 2, а). Яркость поля  $B_3$  подбирают такой, чтобы наблюдалось равенство светлот зрительного ощущения  $S'_3$  и  $S(+0)$  вблизи границы раздела полей (справа). При проверке формулы (10) подбирают равенство светлот  $S''_3$  и  $S(-0)$  слева от границы раздела. Непосредственно на границе (при  $x = 0$ ) производить сравнение не представляется возможным ввиду неопределенности выбора правого или левого поля сравнения и в силу явления иррадиации зрения, приводящего к некоторому размытию границы. Поэтому все измерения с целью определить параметр  $k$  необходимо проводить на некотором малом расстоянии  $x_0$  от границы полей сравнения (рис. 2, в). При  $x = x_0$  соотношения (9) и (10) запишутся следующим образом:

$$B_2^{(1-k-\frac{1}{2}kx_0)} = B_3^{(1-k)} B_1^{\frac{1}{2}kx_0}; \quad (9a)$$

$$B_1^{(1-k+\frac{1}{2}kx_0)} = B_3^{n(1-k)} B_2^{\frac{1}{2}kx_0}. \quad (10a)$$

В этих выражениях  $c_0 = e^{\frac{x_0}{n}}$ . Величину  $c_0$  легко оценить на основании того, что постоянные затухания иррадиации и краевого контраста отличаются не менее чем на порядок. Если в экспериментах ориентироваться на экстремальное значение светлоты (как показано на рис. 2, в), то решающее влияние на значение  $x_0$  оказывает постоянная иррадиации зрения, и отношение  $\frac{x_0}{n}$  с достаточной точностью может быть принято равным 0,1. Тогда  $c = 1,01$ . В то же время в идеализированном случае, представленном формулами (9а) и (10а),  $c_0 = 1$ .

В результате для определения параметра  $k$  получаем рабочие формулы

$$k = \frac{\ln \frac{B_2}{B_3}}{\ln \frac{B_1^{0,45} B_2^{0,55}}{B_3}}; \quad k = \frac{\ln \frac{B_1}{B_3}}{\ln \frac{B_1^{0,45} B_2^{0,55}}{B_3}} \quad (12)$$

Физический смысл параметра  $k$  следует из анализа соотношений (8): при отсутствии влияния механизма подчеркивания контура перепад сигнала на выходе блока 3 математической модели составил бы  $\Delta R' = R_2 - R_1 = (1 - k) c \ln \frac{B_2}{B_1}$  (рис. 2, в). С учетом же действия механизма краевого контраста  $\Delta R = R(+0) - R(-0) = c \ln \frac{B_2}{B_1}$ . Таким образом, во втором случае перепад увеличивается в  $\frac{\Delta R''}{\Delta R'} = \frac{1}{1-k}$  раз.

### Эксперименты

В проведенных нами экспериментах поля сравнения с яркостями  $B_1, B_2, B_3 (B_3'')$  формировались с помощью трех пар дисков Максвелла различных диаметров. На рис. 3 показаны диски до закручивания и после закручивания со сверхкритической скоростью.

Испытуемому предлагалось подобрать яркость поля сравнения  $B_3'$  такой, чтобы ощущение от этой яркости было равно ощущению от яркости  $B_2$  в точке  $+x_0$  максимального подчеркивания контура. В другой серии опытов яркость  $B_3''$  выбиралась испытуемым такой, чтобы получить равенство по светлоте с полем яркости  $B_1$  (в точке  $-x_0$ ). Каждое из полей сравнения образовывалось двумя дисками с известными коэффициентами отражения. Ввиду однозначной зависимости яркости  $B$  от коэффициента отражения  $\rho$  при вычислении параметра  $k$  яркости  $B_1, B_2, B_3', B_3''$  могут быть заменены соответствующими коэффициентами отражения  $\rho_1, \rho_2, \rho_3', \rho_3''$ , каждый из которых, в свою очередь, однозначно зависит от величины угла черного сектора  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3', \alpha_3''$ .

Для опытов на дисках Максвелла входной сигнал можно считать одномерным, так как размеры точки фиксации меньше, чем у полей сравнения. В наших экспериментах использовались диски следующих размеров: для формирования яркости  $B_1$  —  $\varnothing 12$  см, для  $B_2$  —  $\varnothing 20$  см, для яркости  $B_3$  применялся отдельный диск  $\varnothing 20$  см. Во время опытов освещенность составляла 300 лк. Возрастание интенсивности освещенности от 100 до 1000 лк не вносило заметных изменений в измерениях.

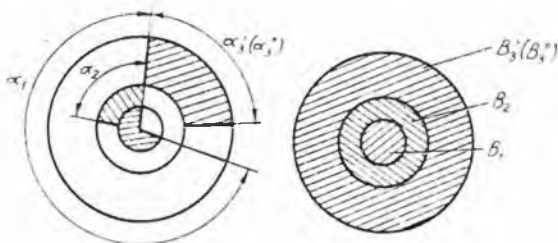


Рис. 3.

Эксперименты проведены для фиксированных значений углов  $\alpha_1$  и различных значений  $\alpha_2$ . Наблюдатель должен был выбрать угол  $\alpha_3$  такой, чтобы отмечалось равенство светлот при сравнении со стороны «темного» поля  $B_1$  (в точке  $-x_0$ ) или со стороны «светлого» поля с яркостью  $B_2$  (в точке  $+x_0$ ).

В опытах принимали участие семь испытуемых. Некоторыми из них каждое измерение повторялось по пять раз. В табл. 1 приведены усредненные результаты экспериментов и вычисленных по формулам (12) значений параметра  $k$ .

Таблица 1

Сравнение по «темному» полю ( $\rho_1 = 58,4\%$ )

$\rho_2, \%$	55	54	51,8	49,4	47,1	44,9	41,5	40,5	38,4	30,4	18	9
$\rho_3, \%$	48	46,85	46	42,4	40	39,7	36,2	35,2	34	25,5	15	7,5
$k$	0,78	0,756	0,66	0,59	0,54	0,48	0,445	0,433	0,39	0,319	0,21	0,115

Сравнение по «светлому» полю ( $\rho_1 = 58,4\%$ )

$\rho_2, \%$	55,1	53,9	52,8	51,8	48,4	47,2	44,9	38,2	36,0	33,6	31,5	29	22,5
$\rho_3, \%$	63,8	63,6	63,4	63,1	62,7	62,2	62,0	61,8	61,1	60,7	60,0	59	58
$k$	0,74	0,69	0,62	0,59	0,435	0,374	0,322	0,202	0,144	0,140	0,08	0,06	0,03

На рис. 4 изображены экспериментальные точки, характеризующие изменения параметра  $k$  в зависимости от  $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$  при сравнении с «темным» ( $\bar{b}$ ) и «светлым» ( $\bar{a}$ ) участками перепада яркости. Для других значений  $\rho_1$  параметр  $k$  изменяется аналогично. Все испытуемые отмечали, что со стороны «темного»

поля сравнивать легче; при этом и разброс показаний отдельных испытуемых меньше. Исправленное среднее квадратическое отклонение при сравнении по «темному» полю составляет приблизительно 2,03 град, при сравнении по «светлому» — 3,29 град. В процессе увеличения числа измерений при одних и тех же  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  (например, до десяти) средние для различных испытуемых значения гораздо ближе располагаются к общей средней точке всех испытуемых. Подобные опыты убеждают о том, что оценки

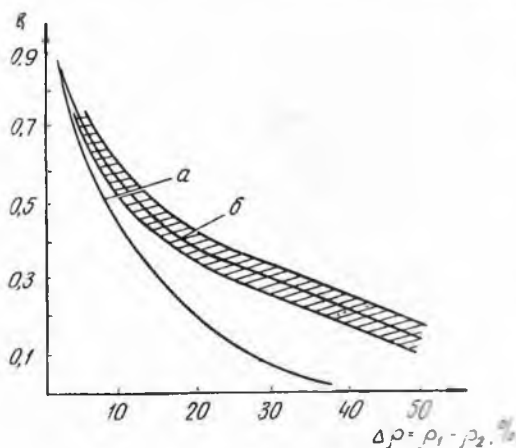


Рис. 4.

метр  $k$  и тем слабее подчеркивается контур. Наоборот, активнее всего механизмы подчеркивания работают на малоконтрастных и «зашумленных» участках изображения. Этот вывод кажется нам весьма важным для синтетического конструирования технических устройств, снабженных механизмами подчеркивания контуров изображения.

Второй вывод касается различия в степени подчеркивания контура для более темного и светлого участков перепада яркости. Как видно из рис. 4, оно возрастает с увеличением перепада яркостей, но для малых перепадов подчеркивание практически одинаково. На рис. 2, в изображен качественный график неравномерного подчеркивания контура. Таким образом, параметр  $k$  для скачкообразного входного сигнала зависит как от величины скачка яркости  $\Delta B = |B_2 - B_1|$ , так и от значения яркости в точке измерения ( $+x_0$  или  $-x_0$ ), т. е.  $k = f(|\Delta B|, B)$ .

Можно предложить множество выражений, аппроксимирующих экспериментальные данные. Хорошую аппроксимацию дает выражение вида  $k = 8,2e^{-(3,8\rho + 81\Delta\rho)}$ . При небольших приращениях  $x$  параметр  $k$ , очевидно, будет функцией дифференциала

$$k = f(\text{dB}) = f\left(\frac{dB}{dx} \cdot dx\right).$$

испытуемых являются статистически несмещенными, а результаты измерений, проведенных различными испытуемыми, можно усреднять.

### Анализ экспериментов

Результаты экспериментов позволяют сделать некоторые выводы. Первый из них заключается в том, что параметр  $k$  изменяется в зависимости от величины перепада яркости на границе. Чем он больше, тем меньше пара-

Чтобы определить, зависит ли параметр подчеркивания контура от градиента  $\frac{dB}{dx}$  функции, исследовалось явление краевого контраста при входных сигналах, показанных на рис. 5, а. На левой половине поля яркость постоянна и равна  $B_1$ . Угол  $\varphi$  линейного изменения яркости правой половины поля зрения выбирался различным в каждом опыте. Как и ранее, поля формировались с помощью двух пар дисков Максвелла, вид на которые до закручивания показан на рис. 5, в.

Реакции математической модели на входные сигналы, представленные на рис. 5, а, хорошо согласуются с фактическим изменением светлоты, наблюдаемым человеком. Реакция модели показана на рис. 5, б. В процессе эксперимента испытуемый выбирает яркость третьего поля сравнения  $B_0$  такой, чтобы имело место равенство светлоты этого поля и светлоты в точке максимального подчеркивания контура ( $-x_0$ ).

Реакцию модели на выходе блока 3 для входного сигнала, изображенного на рис. 5, а, можно записать следующим образом:

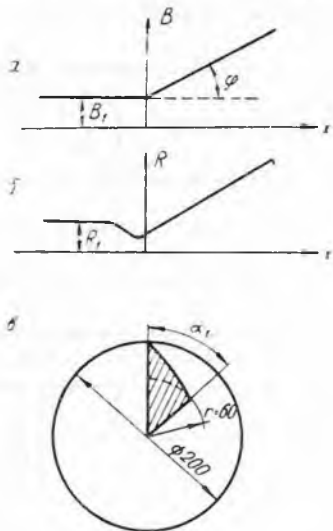


Рис. 5.

$$R(x) = \begin{cases} (1-k)V_1 - \frac{kn}{2} \operatorname{tg} \varphi e^{\frac{x}{n}} & \text{при } x \leq 0, \\ (1-k)V_1 + (1-k) \operatorname{tg} \varphi x - \frac{kn}{2} \operatorname{tg} \varphi e^{-\frac{x}{n}} & \text{при } x > 0. \end{cases} \quad (13)$$

При этом в точке  $x = -0$  величина  $R(-0) = (1-k)c \ln B_1 - \frac{kn}{2} \operatorname{tg} \varphi$ , а для точки  $x = -\infty$  значение  $R(-\infty) = (1-k)c \ln B_0$ .

Приравнявая последние соотношения по условиям опыта и учитывая, что  $S = \varphi(R)$  — взаимно-однозначная функция, получим выражение для параметра  $k$ :

$$k = \frac{c \ln \frac{B_1}{B_0}}{c \ln \frac{B_1}{B_0} + \frac{n}{2} \operatorname{tg} \varphi}. \quad (14)$$

В табл. 2 приведены результаты экспериментов и вычисленных по формуле (14) величин  $k$  для различных значений углов  $\varphi$  линейного изменения яркости. По данным, указанным в работе [4],  $n = 0,33$  град. Поскольку нас интересует лишь изменение  $k$ , то постоянная  $c$  принята равной единице, а логарифмическая

функция соответствует натуральному логарифму. Как видно из табл. 2, параметр  $k$  несколько меняется случайным образом. Эти изменения можно объяснить погрешностями измерений, вытекающими из сложности проведения психофизического эксперимента. Таким образом, для входного сигнала типа «излом» параметр подчеркивания контура не зависит от градиента изменения функции яркости, а характер подчеркивания контура определяется только входным сигналом.

Таблица 2

$\varphi$ , град	$\rho_1 = 63\%$		$\rho_1 = 30\%$	
	$\varphi_0$ , град	$k$	$\varphi_0$ , град	$k$
22	99	0,382	240	0,312
27	103	0,396	247	0,390
34	109	0,40	250	0,483
44	115	0,378	256	0,5
56	125	0,386	262	0,48
		$k = 0,389$	$k = 0,433$	

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. П. Путятин, В. Я. Сердюченко. Вопросы теории краевого контраста зрения. Сб. «Проблемы бионики», вып. 6. Изд-во Харьковск. ун-та, 1971.
2. Е. П. Путятин, В. Я. Сердюченко. Экспериментальное исследование модели краевого контраста зрения. Сб. «Проблемы бионики», вып. 7. Изд-во Харьковск. ун-та, 1971.
3. Д. Грэхэм. Передача изображений посредством кодирования двумерных контуров. ТИИЭР, 55, 3 (1967).
4. Ю. П. Бугай. Исследование нейрореподобных элементов и систем как устройств первичной переработки информации. Автореф. канд. дисс., Харьков, 1969.
5. Ю. П. Шабанов-Кушнаренко, В. Я. Сердюченко. К вопросу моделирования явлений краевого контраста. Сб. «Проблемы бионики», вып. 2. Изд-во Харьковск. ун-та, 1970.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ НОРМАЛИЗАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ. СООБЩЕНИЕ I

**Е. П. Путятин**

Пусть имеется некоторое множество  $M$  изображений, заданных функциями распределения яркости  $B(x, y)$  в поле зрения. Предположим, что задано разбиение множества  $M$ , т. е. совокупность подмножеств  $\{m_\alpha\}$  множества  $M$  такая, что 1)  $m_\alpha \neq \emptyset$ ;

2)  $\bigcup_{\alpha} m_{\alpha} = M$ ; 3) два произвольных подмножества  $m_{\alpha}$  и  $m_{\beta}$  либо не пересекаются, либо совпадают.

Разбиение  $\{m_{\alpha}\}$  определяет на множестве  $M$  отношение эквивалентности. Изображения  $B_1$  и  $B_2$  будут эквивалентны ( $B_1 \sim B_2$ ), если найдется такое множество  $m_{\alpha}$ , что  $B_1, B_2 \in m_{\alpha}$ .

Во многих задачах возникает необходимость задавать в каждом классе эквивалентности некоторый характерный для него элемент, который будем называть нормальным или эталонным.

Интерес представляет следующая задача: по любому изображению из некоторого класса эквивалентности  $m_{\alpha}$  найти нормальное изображение. Назовем ее задачей приведения к эталону, или нормализацией. Очевидно, нормализация эквивалентна построению некоторого оператора (оператора нормализации)  $F: M \rightarrow M$  такого, что если  $B_0$  — эталонное изображение некоторого класса  $m_{\alpha}$ , то  $F(B) = B_0$  для всех  $B \in m_{\alpha}$ .

В дальнейшем будем рассматривать отношения эквивалентности на множестве  $M$ , порождаемые группами преобразований поля зрения. При этом необходимо обосновать существование нормальных элементов, а также выяснить требования, которые предъявляются к конструированию операторов нормализации. Примерами групп преобразований поля зрения служат смещения по осям, вращения, косые сдвиги вдоль одной из осей координат, преобразования подобия, произвольные изменения масштабов. Более общей является группа центроаффинных преобразований.

Пусть  $G$  — одна из таких групп. Изображения  $B_1$  и  $B_2$  станем называть эквивалентными, если найдутся такие преобразования  $g_1, g_2 \in G$ , что

$$B_1(g_1(x, y)) = B_2(g_2(x, y)). \quad (1)$$

Изображение, полученное из  $B$  с помощью преобразования  $g$ , условимся обозначать через  $B \circ g$ .

Легко убедиться, что введенное нами отношение действительно есть отношение эквивалентности. Проверим, например, транзитивность. Если  $B_1 \sim B_2$ ,  $B_2 \sim B_3$ , то в соответствии с нашими определениями найдутся такие преобразования  $g_1, g_2, g_3, g_4$ , что  $B_1 \circ g_1 = B_2 \circ g_2$ ,  $B_2 \circ g_3 = B_3 \circ g_4$ . Отсюда  $B_1 \circ g_1 \circ g_2^{-1} \circ g_3 = B_3 \circ g_4$ , т. е.  $B_1 \sim B_3$ . Рефлексивность и транзитивность очевидны.

**Теорема.** Пусть отношение эквивалентности на множестве изображений порождается группой  $G$ . Тогда оператор нормализации может быть записан в виде

$$F(B) = B \circ \Phi(B), \quad (2)$$

где  $\Phi$  — отображение  $M \rightarrow G$  такое, что:

1) если изображения  $B_1$  и  $B_2$  принадлежат одному классу эквивалентности  $m_{\alpha}$ , то

$$B_1 \circ \Phi(B_1) = B_2 \circ \Phi(B_2). \quad (3)$$

2) в каждом классе эквивалентности  $m$  существует такой элемент  $B$ , что

$$\Phi(B) = e,$$

где  $e$  — нейтральный элемент группы  $G$ , т. е.  $eg = ge = g$  ( $g \in G$ ).

Доказательство. Пусть  $B \in m$ . Рассмотрим множество  $H$  преобразований, которые не изменяют  $B$ . Убедимся, что  $H$  — подгруппа. В самом деле, если для двух преобразований  $h_1, h_2 \in H$  значения  $B \circ h_1 = B$  и  $B \circ h_2 = B$ , то  $B \circ (h_1 \circ h_2) = (B \circ h_1) \circ h_2 = B \circ h_2 = B$ , т. е.  $h_1 \circ h_2 \in H$ . Если  $h \in H$ , т. е.  $B \circ h = B$ , то  $B = B \circ h^{-1}$ . Следовательно,  $h^{-1} \in H$ .

Построим правые классы смежности группы  $G$  по подгруппе  $H$ . Для этого выберем некоторый фиксированный элемент  $g \in G$  и рассмотрим множество  $Hg$ . Классы смежности, как известно, образуют разбиение группы  $G$ .

Покажем, что преобразования  $g_1$  и  $g_2$  принадлежат одному классу смежности в том и только в том случае, когда для них выполняется равенство  $B \circ g_1 = B \circ g_2$ .

Пусть  $g_1, g_2 \in Hg$ , т. е.  $g_1 = h_1g$ ,  $g_2 = h_2g$ . Тогда  $B \circ g_1 = B \circ h_1g = B \circ g$  и  $B \circ g_2 = B \circ h_2g = B \circ g$ , т. е.  $B \circ g_1 = B \circ g_2$ . Обратно: пусть  $B \circ g_1 = B \circ g_2$ . Тогда  $B = B \circ (g_2 \circ g_1^{-1})$ , т. е.  $g_2 \circ g_1^{-1} = h \in H$ . Отсюда  $g_2 = hg_1$ , т. е.  $g_2 \in Hg_1$ . С другой стороны,  $g_1 \in Hg_1$ , так как  $g_1 = eg_1$ .

Определим на классе эквивалентности  $m$  отображение

$$\tilde{\Phi} : m \rightarrow \{Hg_\alpha\}$$

по правилу: если  $B_\alpha = B \circ g_\alpha$ , то

$$\tilde{\Phi}(B_\alpha) = Hg_\alpha.$$

Здесь  $\{Hg_\alpha\}$  — набор правых классов смежности.

В силу доказанного выше это определение корректно. Действительно, допустим, что  $B_\alpha = B \circ g_\alpha$ . Но тогда  $Hg_\alpha = Hg_\alpha$ .

Чтобы построить отображение  $\Phi$ , в каждом смежном классе достаточно выделить некоторый элемент.

Подгруппа  $H$  — тоже смежный класс, поскольку  $He = H$ . Выделяя в этом классе нейтральный элемент, получаем  $\Phi(B) = e$ . Теорема доказана. Изображение  $B$ , для которого  $\Phi(B) = e$ , будем называть эталонным и обозначать  $B_0$ .

Для многих групп преобразований подгруппа  $H$  состоит всего из одного нейтрального элемента  $e$ . Примерами таких групп являются смещения изображений по осям, косые сдвиги, произвольные изменения масштабов. Так, для группы смещений произвольное изображение  $B$  сохранит свое положение в поле зрения лишь при условии влияния на него нейтрального преобразования  $e$ , для которого параметры смещений равны нулю. Точно так же лишь тождественные (нейтральные) преобразования

масштабов или косо́го сдвига не видоизменяют форму произвольного изображения\*.

Для группы вращений подгруппа  $H$  может содержать самое различное количество элементов. Например, для изображения, представляющего собой квадрат постоянной яркости,  $H = \{u_i\}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), где  $u_i$  — преобразования, соответствующие углу поворота, равному  $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3}{2}\pi$ . Считаем, что поворот на угол  $2\pi$  соответствует нейтральному преобразованию. Для круга постоянной яркости  $H = G$ . В таких случаях нормализация осуществляется в два этапа: на первом производится отображение  $\Phi: M \rightarrow |Hg_x|$ , на втором  $|Hg_x| \rightarrow g_{x0}$ . Чаще всего выбирается  $g_{x0} = e$ .

Пусть  $B_0$  и  $B$  — эталонное и произвольное изображения, принадлежащие одному классу эквивалентности. Конкретизировать требования, предъявляемые к отображению  $\Phi: M \rightarrow G$ , позволяет

Следствие. Чтобы оператор (2) был нормализующим, необходимо и достаточно выполнить соотношение

$$g \circ \Phi(B) = \Phi(B_0). \quad (4)$$

Действительно, в результате использования оператора нормализации произвольное изображение  $B$  приводится к эталонному  $B_0$ . С учетом этого нормализатор (2) можно записать в виде

$$F(B) = B \circ \Phi(B) = B_0 \circ \Phi(B_0). \quad (5)$$

Однако изображения  $B$  и  $B_0$  связаны некоторым преобразованием  $g \in G$ . Поэтому

$$B = B_0 \circ g. \quad (6)$$

Подставляя преобразование (6) в оператор (5), получаем условие (4). Достаточность очевидна.

Рассмотрим построение нормализаторов для конкретных групп преобразований. Каждое преобразование  $g \in G$  однозначно характеризуется совокупностью параметров  $\{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ . Аддитивные и мультипликативные преобразования станем различать в зависимости от того, складываются или перемножаются соответствующие параметры для суперпозиции преобразований.

1. Аддитивная группа смещений по осям, однозначно характеризуемая двумя параметрами  $g(l_1, l_2)$ , которые представляют собой смещения изображения по осям координат, изоморфна аддитивной группе вещественных чисел по каждому параметру. Поэтому отображение  $\Phi: M \rightarrow G$  есть вектор-функция  $\Phi[\Phi_1(B), \Phi_2(B)]$ , компоненты которой — вещественные функционалы. Оператор нормализации запишется в виде

$$F(B) = B[x + \Phi_1(B), y + \Phi_2(B)], \quad (7)$$

\* Исключением для этих преобразований является изображение бесконечных размеров с постоянной яркостью в поле зрения. Для него  $H = G$ .

где функционалы  $\Phi_1(B)$  и  $\Phi_2(B)$  определяются из условия (4):

$$\begin{aligned}\Phi_1(B) - \Phi_1(B_0) &= l_1; \\ \Phi_2(B) - \Phi_2(B_0) &= l_2,\end{aligned}\quad (8)$$

а изображение

$$B = B_0(x - l_1, y - l_2).$$

2. Для аддитивной группы вращений произвольное и эталонное изображения связаны условием

$$B = B_0(x \cos \theta + y \sin \theta, -x \sin \theta + y \cos \theta),$$

или в полярной системе координат

$$B = B_0(\rho, \varphi - \theta).$$

Оператор нормализации будет иметь вид

$$F(B) = B[x \cos \Phi(B) - y \sin \Phi(B), x \sin \Phi(B) + y \cos \Phi(B)] \quad (9)$$

либо

$$F(B) = B[\rho, \varphi + \Phi(B)], \quad (10)$$

где вещественный функционал  $\Phi(B)$  должен удовлетворять условию

$$\Phi(B) - \Phi(B_0) = \theta + 2\pi n \quad (n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (11)$$

Функционалы, удовлетворяющие условиям (8), (11), приведены в работах [1—3].

3. Преобразования косоугольного сдвига, например, вдоль оси абсцисс, характеризуются параметром  $k$  и изоморфны группе вещественных чисел по сложению:

$$B = B_0(x - ky, y). \quad (12)$$

Оператор нормализации имеет вид

$$F(B) = B[x + \Phi(B)y, y], \quad (13)$$

где вещественный функционал  $\Phi(B)$  удовлетворяет условию

$$\Phi(B) - \Phi(B_0) = k. \quad (14)$$

Условию (13) удовлетворяет, например, функционал

$$\Phi(B) = \frac{\int_D f[B(x, y)] x \varphi(y) dx dy}{\int_D f[B(x, y)] y \varphi(y) dx dy}, \quad (15)$$

где  $f(B)$  — некоторая функция такая, что  $f(B) = 0$ , если  $B = 0$ , и произвольная в остальных случаях;  $\varphi(y)$  — произвольная функция;  $D$  — область поля зрения.

Действительно, подставляя соотношение (12) под знаки интегралов функционала (15) и заменяя переменные (в предположении, что всевозможные преобразования косоугольного сдвига не выводят изображения за пределы поля зрения), получаем условие (14).

Рассмотрим мультипликативные преобразования носителя изображений в поле зрения.

4. Группа изменений масштабов, для которой эталонное и произвольное изображения связаны соотношением  $B = B_0(\lambda x, \mu y)$ , однозначно характеризуется двумя параметрами  $g(\lambda, \mu)$  и изоморфна мультипликативной группе положительных вещественных чисел по каждому параметру. В этом случае отображение  $\Phi: M \rightarrow G$  характеризуется диагональной матрицей, элементы которой — вещественные функционалы, а оператор нормализации представляет собой преобразование

$$F(B) = B[\Phi_1(B)x, \Phi_2(B)y]. \quad (16)$$

Требования к функционалам  $\Phi_1(B)$  и  $\Phi_2(B)$  определяются из условия (4):

$$\begin{aligned} \lambda\Phi_1(B) &= \Phi_1(B_0); \\ \mu\Phi_2(B) &= \Phi_2(B_0). \end{aligned} \quad (17)$$

5. В частном случае преобразований подобия, когда изменяется общий масштаб изображения и  $\lambda = \mu$ , нормализатор

$$F(B) = B[\Phi(B)x, \Phi(B)y], \quad (18)$$

где  $\Phi(B)$  — положительный вещественный функционал, удовлетворяющий условию

$$\lambda\Phi(B) = \Phi(B_0). \quad (19)$$

6. Для случая гиперболического поворота  $B = B_0\left(\lambda x, \frac{1}{\lambda} y\right)$ .

Если оператор нормализации имеет вид (16), то для входящих в него функционалов должны выполняться соотношения

$$\begin{aligned} \lambda\Phi_1(B) &= \Phi_1(B_0); \\ \Phi_2(B) &= \lambda\Phi_2(B_0) = \frac{1}{\Phi_1(B)}. \end{aligned} \quad (20)$$

В работе [4] приведены функционалы, удовлетворяющие условиям (17), (19) и (20).

7. Важное значение имеют преобразования зеркального отражения относительно осей координат\*. Отражения сами по себе не образуют группы, но их можно рассматривать как двухпараметрические преобразования, поскольку они могут осуществляться относительно осей абсцисс и ординат.

В задачах нормализации интересно установить, является ли данное изображение зеркально отраженным относительно эталона или нет. В этом смысле преобразования отражений можно рассматривать как группу, изоморфную мультипликативной

---

\* Зеркальные отражения относительно произвольной прямой, как известно, — результат суперпозиции преобразований смещения, вращения и отражения относительно осей координат.

группе чисел  $I = \{1, -1\}$  по каждому параметру, а отображение  $\Phi: M \rightarrow I$  — как диагональную матрицу с элементами  $\text{sign } \Phi_1(B)$ ,  $\text{sign } \Phi_2(B)$ , где  $\Phi_1(B)$  и  $\Phi_2(B)$  — вещественные функционалы, знак которых — критерий зеркального отражения относительно оси абсцисс и ординат. Оператор нормализации запишется в виде

$$F(B) = B[\text{sign } \Phi_1(B)x, \text{sign } \Phi_2(B)y]. \quad (21)$$

Функционалом  $\Phi_1(B)$  может являться разность абсцисс двух характерных точек на изображении, функционалом  $\Phi_2(B)$  — разность ординат тех же точек. Если изображение предварительно центрировано (например, так, что центр тяжести совпадает с началом координат), то функционалами  $\Phi_1(B)$  и  $\Phi_2(B)$  могут служить абсцисса и ордината лишь одной характерной точки. Ею могут быть геометрический центр изображения или же точки, определяемые моментами второго или более высокого порядков. Важно, чтобы в этом случае вторая характерная точка не совпала с началом координат.

Знак абсциссы и ординаты характерной точки, соответствующей произвольным моментам, удобно определять, вычисляя разности

$$\Phi_1(B) = \iint_{D_1} B(x, y) x^p y^q dx dy - \iint_{D_2} B(x, y) x^p y^q dx dy; \quad (22)$$

$$\Phi_2(B) = \iint_{D_3} B(x, y) x^p y^q dx dy - \iint_{D_4} B(x, y) x^p y^q dx dy,$$

где  $p, q = 0, 1, 2, \dots$ ;  $D_1, D_2, D_3, D_4$  — соответственно правая, левая, верхняя и нижняя половины поля зрения.

Порядок моментов  $p$  и  $q$  выбирается из соображений простоты вычислений и чувствительности критерия (22). Функционалы  $\Phi_1(B)$  и  $\Phi_2(B)$  заведомо равны нулю для симметричных относительно осей координат изображений, но такие изображения принадлежат и подгруппе  $H = I$  неразличимых элементов.

8. Центраффинные преобразования изображений изоморфны мультипликативной группе невырожденных матриц порядка  $2 \times 2$ . Эталонное и произвольное изображения из некоторого класса эквивалентности связаны соотношением

$$B = B_0(a_{11}x + a_{12}y, a_{21}x + a_{22}y), \quad (23)$$

где  $\det(a_{ij}) \neq 0$ ;  $i = 1, 2$ ;  $j = 1, 2$ .

Отображение  $\Phi: M \rightarrow G$  представляет собой матрицу функционалов  $(\Phi_{ij}(B))$  ( $i = 1, 2$ ;  $j = 1, 2$ ) таких, что  $\det \Phi_{ij} \neq 0$ .

Оператор нормализации имеет вид

$$F(B) = B(\Phi_{11}x + \Phi_{12}y, \Phi_{21}x + \Phi_{22}y), \quad (24)$$

где в соответствии с условиями (4) функционалы  $\Phi_{ij}(B)$  удовлетворяют соотношению

$$\begin{pmatrix} a_{11}a_{12} \\ a_{21}a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_{11}(B) \Phi_{12}(B) \\ \Phi_{21}(B) \Phi_{22}(B) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_{11}(B_0) \Phi_{12}(B_0) \\ \Phi_{21}(B_0) \Phi_{22}(B_0) \end{pmatrix}. \quad (25)$$

В качестве функционалов  $\Phi_{ij}$  могут быть выбраны обобщенные центры тяжести [5].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Е. П. Путятин и др. К вопросу о моделировании механизмов нормализации зрительных образов. Сб. «Проблемы бионики», вып. 5. Изд-во Харьковск. ун-та, 1971.

2. Е. П. Путятин и др. Построение инвариантов смещения и поворота зрительных картин. Сб. «Биологическая, медицинская кибернетика и бионика», вып. 3. Ин-т кибернетики АН УССР, Киев, 1970.

3. Е. П. Путятин и др. Нормализация вращений плоских изображений. Сб. «Проблемы бионики», вып. 9. Изд-во Харьковск. ун-та, 1972.

4. Е. П. Путятин и др. Нормализация зрительных картин при изменении масштаба. Сб. «Проблемы бионики», вып. 8. Изд-во Харьковск. ун-та, 1972.

5. Е. П. Путятин и др. Нормализация изображений при аффинных преобразованиях. Сб. «Проблемы бионики», вып. 8. Изд-во Харьковск. ун-та, 1972.

## ПОТРЕБНОСТИ И ПСИХИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

*В. С. Манешин*

Важнейший признак жизни — наличие требований, от удовлетворения которых зависит связанная с ее продолжением деятельность. Это прежде всего потребности в пище, определенном поведении, обеспечении связи между различными частями организма и в продолжении рода. Они в одинаковой мере присущи всем живым системам и вынуждают их обращаться к окружающей действительности, определенным образом взаимодействовать с ней, проявлять не всегда подкрепляемую заметными усилиями со стороны нервных клеток, тканей и центров активность. В результате часто создается ошибочное представление об отсутствии какой-либо связи между потребностями и нервной деятельностью, между имеющими цель сохранения жизни отправлениями организма и психикой. Однако такая связь существует, и любая деятельность в условиях потребления зависит от особым образом организованной материи, ее принципиально новых функций.

Потребности первоначально возникают как вполне определенные физиологические состояния организма, как его стремления к поддержанию своего существования на запрограммированном природой и закрепленном естественным отбором уровне. Последующее развитие процесса связано с активацией нервных клеток, тканей или центров и превращением потребностей в психический феномен, во влечение животного. Это начальное проявление активности дополняется затем предваряющими потребление целесообразными действиями и самим актом потребления: при наличии потребностей их носитель начинает испытывать беспокойство, приходит в состояние некоторой напряженности и готовности к действию, выделяет из окружающей среды необходимые предметы и превращает их в объекты своего соответствующего поведения. Источник активности живых существ, таким образом, следует

искать в потребностях и в то же время учитывать, что они непосредственно не возбуждают и не направляют ее, не регулируют всего связанного с их удовлетворением поведения. Последнее есть результат детерминируемой потребностями психической деятельности, возбуждаемых в нервных клетках, тканях или центрах психических процессов.

Одноклеточные организмы и растения удовлетворяют свои крайне примитивные потребности путем присвоения веществ из окружающей их среды, что вполне обеспечивается раздражимостью, способностью реагировать на внешние воздействия изменением формы, положения, химизма тела и т. д. Многоклеточные живые организмы с их более развитыми потребностями, которые дополняются еще и потребностью в обеспечении связи между различными частями организма, переходят к более сложной организации — к специализации клеток и тканей. Одни из них — нервные клетки и ткани — начинают обеспечивать наиболее целесообразное поведение в данных условиях и обстоятельствах, создают психические эквиваленты физиологических процессов. Другие — мышечные клетки и ткани — выполняют необходимые для удовлетворения потребностей движения и действия. По мере эволюции организмов нервные клетки объединяются в нервные узлы и в единую нервную систему вначале со спинным, а затем и с головным мозгом как ее центром и определяющим поведение животного органом. Одновременно происходят изменения в строении и подвижности живых существ способствуют возрастанию активности и повышению уровня нервной деятельности, обеспечивают более сложное приспособительное поведение.

Передвижение с целью поисков пищи в воде, на земле и в воздухе неизбежно расширяет круг объектов, с которыми животный организм встречается и из числа которых он должен выделить имеющие значение для поддержания его жизнедеятельности. Усложняется координация действий, управление всей системой в целом. Психика в этих условиях вынуждена вырабатывать известную избирательность, анализировать и синтезировать различные объекты внешней среды, образовывать условно-рефлекторные связи и необходимые для обеспечения активности внутренние состояния. Она в конечном счете оказывается пластичной и способной не только к установлению и замене временных связей со средой, но и к поддержанию на должном уровне внутренней устремленности к обозначенной потребностями цели.

Однако в поведении организмов с неразвитой нервной системой все же преобладает инстинкт, врожденные или безусловные рефлексы в сочетании с условно-рефлекторными компонентами. На такой стадии развития живые существа весьма ограничены в своей способности к перестройке, особенно при резком отклонении от привычных, ставших для них нормой условий, и погибают в необычных для них жизненных ситуациях. Вместе с тем следует иметь в виду, что инстинктивное поведение часто бывает

у них весьма сложным и во всяком случае обеспечивающим удовлетворение потребностей. В качестве примера можно сослаться на то, как ухаживают за своим потомством муравьи и пчелы, какие ловушки для живой добычи создают пауки на плантации муравьев, их симбиоз с тлями.

Представители более высокой ступени эволюционного развития (рыбы, амфибии, рептилии, птицы, некоторые виды млекопитающих) для удовлетворения своих возросших потребностей нуждаются не только в новых формах взаимодействия со средой, но и в значительном расширении района обитания, что связано с неизбежными колебаниями температурных, световых, химических и биологических факторов. Это приводит к постепенным, а в ряде случаев и к резким изменениям в анатомическом строении и психической деятельности указанных представителей животного мира. Например, у рыб, жизнь которых протекает в сравнительно однородной среде, формируется, хотя и слабо развитая, центральная нервная система и появляются своеобразные рецепторы. Обонятельная, вкусовая, осязательная, температурная, зрительная, слуховая чувствительности дополняются вибрационной, усложняются психические процессы, в том числе аналитико-синтетическая деятельность. Птицы, удовлетворение потребностей которых требует больших усилий в связи с неоднородными характеристиками района обитания и иным, чем у рыб, образом жизни, при анализе и синтезе широко используют индивидуальный опыт, энергичную двигательную активность дополняют более совершенной избирательной и сравнительно сложной внутренней активностью. Их способности в полной мере проявляются лишь при строго определенных условиях, а отклонение от нормы сопровождается, как правило, нецелесообразными действиями.

На изменение условий существования живые организмы отвечают немедленным изменением не организации, а своего поведения. Поэтому для сохранения их жизнедеятельности важное значение имеет такое приспособление к окружающей среде, при котором учитывались бы ее наличные и возможные ситуации, опережались наступающие и будущие изменения. Развившие эту способность высшие животные отчасти улавливают даже объективные связи некоторых жизненно необходимых для них явлений и в ряде случаев абстрагируются от удовлетворяющей только биологические потребности деятельности. Для них характерно также относительно сложное поведение и способность применять в отдельных ситуациях естественные орудия, но лишь в рамках установившегося и закрепленного рассудком шаблона или усвоенных, но также не выходящих за его границы навыков.

Подобная консервативность сознания объясняется прежде всего тем, что рассудок не в состоянии преодолеть биологической замкнутости потребностей и вывести их из весьма ограниченной сферы естественных нужд. В результате живые существа не

ставятся в условия, которые бы ежедневно вынуждали ко все более активным действиям в целях решения постоянно меняющихся задач и достижения непрерывно усложняющихся целей. Их нервные центры лишаются своего главного стимула и не развиваются как с точки зрения дальнейшего повышения уровня аналитико-синтетических процессов и избирательной активности, так и внутренних субъективных состояний. Психика ограничивается заданной и передающейся по наследству программой жизнедеятельности.

Рассудок обеспечивает знание внешней среды в той мере, в какой это необходимо для удовлетворения потребностей в постоянно изменяющихся условиях и обстоятельствах. При его посредстве высшие животные анализируют и синтезируют настоящее, предвидят будущее на основании прошлого опыта, оценивают необходимые для них и встречающиеся в действительности предметы и явления. В их психических актах ярче, чем у низших представителей животного мира, проявляются внутренние субъективные состояния, эмоции, обеспечивающие активность организма во всех его отношениях с внешней средой. Однако высшие животные, выступая в роли потребителей, субъектов действия, в то же время не осознают этого, не опосредуют своего потребительского отношения к окружающей действительности целенаправленной деятельностью и ограничиваются сравнительно небольшим перечнем природных предметов.

В отличие от высших животных, человек производит необходимые блага для удовлетворения своих потребностей. В этих условиях объекты подавляющего большинства потребностей предстают перед субъектом не в готовом, как прежде, виде, а в форме цели, требующей напряжения и упражнения нервных центров. Потребности, таким образом, как бы отдаляются от акта их удовлетворения, а образующийся между ними промежуток заполняется возникающими в процессе производства общественными отношениями и различного рода духовными интересами. Преодолевается биологическая замкнутость животного. Человек начинает изменять не только окружающую его природу, но и свои потребности, а вместе с ними и самого себя.

Он осознает свою роль как субъекта познания и действия, наряду с постановкой цели обеспечивает также выбор средств для ее достижения. Психическая деятельность человека становится все более подвижной, гибкой и свободной от наличной ситуации. Рассудочное мышление дополняется разумным, непрерывно совершенствуется и в конечном счете превращается в особую потребность в познании. Возникают и другие духовные потребности — в правилах и нормах человеческого общежития, в новых формах общения между людьми и т. д., что, в свою очередь, сказывается на материальных потребностях, приводит к изменению их характера и динамики, способов удовлетворения и активности самого человека. Коренным образом изменяются и потребности, унасле-

дованные от животных предков: они превращаются в социально окрашенные и подлинно человеческие.

Вновь возникшие и преобразованные потребности обусловили целенаправленный характер всей практической деятельности субъекта, его общественно-исторической практики и одновременно стали испытывать ее обратное воздействие, формироваться и развиваться под ее определяющим влиянием. История человека с самого начала оказалась историей непрерывно возрастающего производства материальных и духовных благ, удовлетворения имеющихся и порождения новых потребностей, историей их прямо или опосредствованно направляемого разумом и общественно-исторической практикой становления и развития. Без такой связи потребностей с практической деятельностью и сознанием человеческая активность и тем более труд как ее высшее проявление были бы невозможны.

Вновь возникшие потребности и новые, более совершенные способы их удовлетворения оказали решающее воздействие и на другие стороны психической деятельности субъекта — на его избирательную и субъективную активность, аксиологическую интерпретацию познанного и на обеспечивающие различные проявления активности эмоциональные состояния. Человек, наряду с окружающей его действительностью, оценивает также собственные поступки и действия, прошлое, настоящее и будущее, а в необходимых случаях пересматривает оценки. В зависимости от потребностей и обусловленной ими установки сознания он контролирует и внутренние субъективные состояния. В свою очередь, эти проявления психики так или иначе влияют на потребности, способствуют их совершенствованию, а иногда и становлению (например, эстетической потребности).

Таким образом, очевидна прямая взаимосвязь между потребностями и психикой, между потреблением и состоянием живой системы в каждый момент, между происходящими в ней и обеспечивающими ее активностью психическими процессами. Только благодаря тому, что потребности направляли и развивали психическую деятельность, а она способствовала совершенствованию имеющихся и формированию новых потребностей, человек выделился из животного мира и стал человеком в собственном смысле этого слова.

## КОНЕЧНЫЕ АВТОМАТЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

*А. М. Пряницкий, И. В. Витенько*

В настоящее время особый интерес представляют читающие автоматы, которые можно разбить на два блока  $B_1$  и  $B_2$  (рис. 1).

На блок  $B_1$  подается распознаваемый объект  $y$ . На выходе блока  $B_1$  под действием объекта  $y$  появляется слово  $S$  из неко-

того конечного алфавита  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  ( $n \geq 1$ ). Таким образом, слово  $S$  является значением некоторой функции  $S(y)$ , реализуемой блоком  $B_1$ .

На функцию  $S(y)$  накладывается требование: если  $y$  и  $z$  — объекты, представляющие различные образы, то  $S(y) \neq S(z)$ . Слово  $S$  подается на блок  $B_2$ . Последний перерабатывает  $S$  в некоторый сигнал  $\tau$ , где  $\tau$  — признак класса образов, которому принадлежит объект  $y$ . Множество сигналов  $\tau$  конечно, ибо число классов образов является конечным (последнее, естественно, предполагается в теории распознавания).

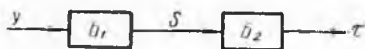


Рис. 1.

Из вышесказанного ясно, что блок  $B_2$  представляет собой дискретный преобразователь информации. Данный блок, в сущности, представляет собой автомат, распознающий слово  $S$ . В дальнейшем под блоком  $B_2$  будем понимать конечный автомат.

### Автоматы с заключительными состояниями

Пусть  $T_m$  — множество всех слов длины  $m$  над алфавитом  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  ( $m, n \geq 1$ ). Конечный автомат  $M^{(F)}$ , распознающий слова из  $T_m$ , определяется с помощью следующих объектов.

1. Конечного множества  $S$  состояний автомата  $M^{(F)}$ ;  $S_0$  — исходное состояние ( $S_0 \in S$ ).

2. Функции переходов  $\varphi(s, x)$ , где  $s \in S$ ;  $x \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Автомат функционирует в дискретном времени  $t = 0; 1; 2$  следующим образом:  $s(t+1) = \varphi(s(t), x(t+1))$ ;  $s(0) = S_0$ . Функция  $\varphi(s, x)$  определена при всех  $s$  и  $x$ .

3. Множества заключительных состояний  $S_k \subset S$ . Состояние  $s \in S_k$  тогда и только тогда, когда  $\varphi(s, x) = S$  при любом  $x \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ .

Любое слово из  $T_m$  переводит автомат  $M^{(F)}$  в некоторое заключительное состояние.

Пусть  $S_1^k, S_2^k, \dots, S_p^k$  — все состояния из множества  $S_k$ .

Через  $T_m(S_i^k)$  обозначим множество слов из  $T_m$ , которые переводят автомат в состояние  $S_i^k$  ( $i = 1, 2, \dots, p$ ). Будем считать, что  $T_m(S_i^k) \neq \emptyset$  при любом  $i = 1, 2, \dots, p$ . Семейство множеств  $T_m(S_i^k)$  образует некоторое разбиение множества  $T_m$ . Таким образом, автомату  $M^{(F)}$  однозначно соответствует разбиение множества  $T_m$ .

Пусть теперь задано любое разбиение множества  $T_m$ , где

$$T_m = O_1 \cup O_2 \cup \dots \cup O_q \quad (1)$$

из  $O_j \neq \emptyset$  ( $j = 1, 2, \dots, q$ ) и  $O_k \cap O_l = \emptyset$  при  $k \neq l$ .

Построим автомат, реализующий разбиение (1). Рассмотрим символы  $S_{i_1 i_2 \dots i_k}$ ;  $0 < k \leq m-1$ ;  $1 < i_1 i_2 \dots i_k \leq n$  и  $\bar{S}_1, \bar{S}_2, \dots, \bar{S}_q$ . Числу  $k=0$  соответствует символ  $S_0$ .

Определенные символы будем считать состояниями некоторого автомата:  $S_0$  — начальное состояние автомата;  $\bar{S}_p, \bar{S}_1, \dots, \bar{S}_q$  — заключительные состояния автомата.

Функция переходов автомата описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \varphi(S_0, x_i) &= S_i \quad (i = 1, 2, \dots, n); \\ \varphi(S_{i_1 i_2 \dots i_k}, x_t) &= S_{i_1 i_2 \dots i_k t} \quad \text{при } 1 < k < m-2; \\ \varphi(S_{i_1 i_2 \dots i_{m-1}}, x_t) &= \bar{S}_j \quad (j = 1, 2, \dots, q), \end{aligned}$$

если слово  $x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_{m-1}}$ ,  $x_t$  принадлежит множеству  $O_j$ . Очевидно, что построенный нами автомат реализует разбиение (1). При синтезе автомата, реализующего разбиение (1), возникает проблема минимизации количества состояний данного автомата.

Обозначим через  $N(T_m)$  множество всех непустых начальных отрезков слов множества  $T_m$ , причем  $N(T_m) \supset T_m$ . Над словами  $S_l$  длины  $l \geq m$  введем операцию  $R(S_l)$ :

$$R(S_l) = S_m,$$

где  $S_m$  — начальный отрезок длины  $m$  слова  $S_l$ .

В множестве  $N(T_m)$  введем эквивалентность следующего типа:  $S_k \sim S_t$  тогда и только тогда, когда слова  $R(S_k S_m)$  и  $R(S_t S_m)$  при любом  $S_m \in T_m$  принадлежат одной компоненте разбиения (1). Произведение  $S_k S_m$  представляет собой композицию слов  $S_k$  и  $S_m$ . Очевидно, что данное соотношение удовлетворяет основным свойствам эквивалентности: рефлексивности, симметричности и транзитивности.

Пусть задан автомат  $M^{(F)}$ , реализующий разбиение (1);  $S_1$  — состояние автомата. Через  $\varphi(S_1, x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_m})$  обозначим состояние, в которое автомат перейдет из  $S_1$  под действием слова  $x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_m}$ . Состояния  $S_1$  и  $S_2$  называются эквивалентными, если

$$\varphi(S_1, x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_m}) = \varphi(S_2, x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_m}),$$

где  $x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_m}$  — любое слово из множества  $T_m$ . Из определенных эквивалентных слов и состояний непосредственно вытекает следующая

**Лемма 1.** Состояния  $S_1$  и  $S_2$  автомата  $M^{(F)}$  тогда и только тогда эквивалентны, когда слова  $x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_r}$  и  $x_{j_1} x_{j_2} \dots x_{j_s}$ , удовлетворяющие условиям  $S_1 = \varphi(S_0, x_{i_1} x_{i_2} \dots x_{i_r})$  и  $S_2 = \varphi(S_0, x_{j_1} x_{j_2} \dots x_{j_s})$  эквивалентны между собой.

Из леммы 1 вытекает, что автоматы, реализующие одно и то же разбиение (1), обладают равными количествами классов эквивалентности состояний. Это число равно количеству классов экви-

валентности слов из множества  $N(T_m)$ . Задача построения минимального автомата состоит в том, чтобы каждый класс эквивалентности состояний содержал не более одного состояния.

Перейдем к построению минимального автомата. Чтобы избежать громоздкости изложения, построение минимального автомата проиллюстрируем на конкретном примере.

Рассмотрим множество  $T_3$  из алфавита 0, 1, 2 и разбиение

$$O_1 = \{000, 010, 022, 100, 101, 102, 110, 111, 112, 121, 122, 200, 210, 211, 222\}; \quad (2)$$

$$O_2 = \{001, 012, 020, 021, 201, 220, 221\};$$

$$O_3 = \{002, 202\}.$$

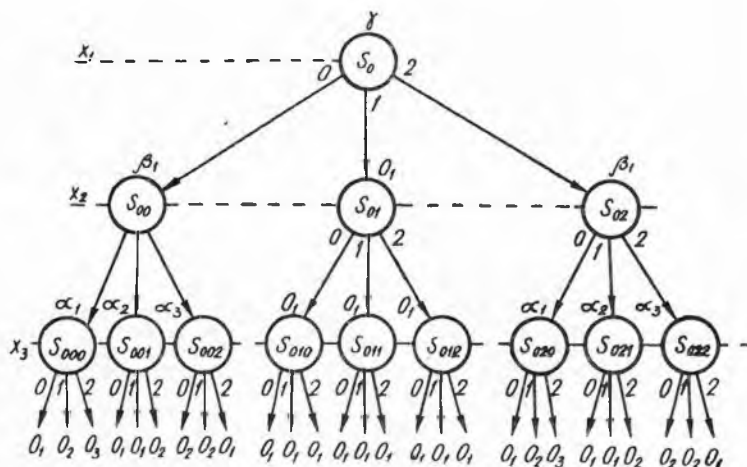


Рис. 2.

Слово из  $T_3$  будем обозначать через  $x_1x_2x_3$ .

По разбиению (2) составим дерево (рис. 2). На нем каждому пути, начинающемуся в вершине  $S_0$  и заканчивающемуся в одной из вершин  $O_i$  ( $i \geq 1, 2, 3$ ), однозначно соответствует некоторое слово  $x_1x_2x_3$ . Так, левому крайнему пути соответствует слово 000. Если слово  $x_1x_2x_3$  принадлежит компоненте  $O_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ), то в конце соответствующего пути стоит символ  $O_i$ . Например, слово 022 принадлежит компоненте  $O_1$ . Значит, в конце соответствующего пути стоит символ  $O_1$ .

Дерево (рис. 2) представляет автомат, реализующий разбиение (2);  $S_0, S_{00}, \dots, S_{222}$ ;  $O_1, O_2, O_3$  — состояния данного автомата, а  $O_1, O_2, O_3$  — заключительные состояния.

Последний ярус дерева (рис. 2) должен состоять из трех вершин  $O_1, O_2, O_3$ . Для удобства данный ярус показан в развернутом виде. Переходы изображены стрелками. Буквы под

стрелками представляют собой входные сигналы, под действием которых совершаются переходы автомата.

Рассмотрим следующий процесс расстановки меток возле вершин дерева (рис. 2).

Пусть  $S$  — вершина яруса  $x_3$ . Через  $S_i$  ( $i = 0, 1, 2$ ) обозначим символ  $O_j$  ( $j = 1, 2, 3$ ), который стоит в конце исходящей из вершин  $S$  стрелки с номером  $i$ .

Если  $S_{(0)} = S_{(1)} = S_{(2)} = O_i$  ( $i = 0, 1, 2$ ), то вершину  $S$  отметим символом  $O_i$ . В противном случае вершину отмечаем символом, отличным от  $O_1, O_2, O_3$ . Вершины  $S_1$  и  $S_2$  яруса  $x_3$  отмечают одинаковыми символами только тогда, когда  $S_{1(i)} = S_{2(i)}$  при всех  $i = 0, 1, 2$ .

Пусть уже отмечены вершины  $m$ ,  $(m+1)$ ,  $(m+2)$  ярусов (счет ярусов идет сверху вниз). Вершины  $m-1$  яруса отмечаются следующим образом. Пусть  $S$  — вершина  $(m-1)$ -яруса. Через  $S_{(i)}$  ( $i = 0, 1, 2$ ) обозначим метку, которая стоит возле вершины, в которую входит стрелка с номером  $i$ , исходящая из  $S$ . Вершины  $S_1$  и  $S_2$   $(m-1)$ -яруса отмечаются одинаковыми символами тогда и только тогда, когда  $S_{1(i)} = S_{2(i)}$  при всех  $i = 0, 1, 2$ .

Если  $S_{(0)} = S_{(1)} = S_{(2)} = O_i$  ( $i = 0, 1, 2$ ), то вершину  $S$  отмечается символом  $O_i$ . Если в ярусе  $m-1, m, m+1, \dots, n$  найдется вершина  $S$  такая, что  $S_{(i)} = S'_{(i)}$  при всех  $i = 0; 1; 2$ , то вершину  $S$  отмечаем той же меткой, что и  $S'$ .

Если ни одно из вышеуказанных условий не выполняется, то вершину  $S$  отмечаем меткой, отличной от всех ранее введенных.

Процесс построения меток заканчивается после достижения вершины  $S_0$ .

В нашем примере (рис. 2) получим следующие метки:

$$\gamma_1; \beta_1, \beta_2; \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3; O_1, O_2, O_3.$$

Из леммы 1 вытекает, что вершины отмечаются одинаковыми метками тогда и только тогда, когда данные вершины представляют эквивалентные состояния автомата, изображенные в виде дерева (рис. 2).

Совмещая эквивалентные состояния, в итоге получим автомат, изображенный на рис. 3. Обозначим его через  $M_{\min}^{(F)}$ . Здесь  $O_1, O_2, O_3$  — заключительные состояния автомата  $M_{\min}^{(F)}$ ;  $S_0$  — начало состояния данного автомата.

Автоматы  $M_{\min}^{(F)}$  обладают минимальным числом состояний среди всех автоматов типа  $M^{(F)}$ , реализующих разбиение (2).

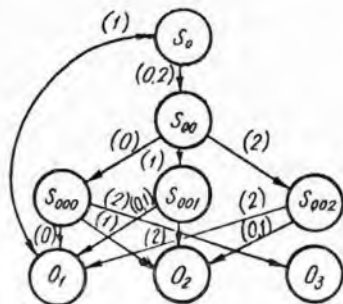


Рис. 3.

## Автоматы Мура

Пусть  $P$  — некоторое множество слов из алфавита  $X = \{x_1 x_2 \dots x_n\}$  и  $R$  — разбиение  $P$ , равное  $P = O_1 \cup O_2 \cup \dots \cup O_q$ . Здесь  $O_i \neq \emptyset$  ( $i = 1, 2, \dots, q$ );  $O_i \cap O_j = \emptyset$  при  $i \neq j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, q$ );  $O_i$  — компоненты разбиения  $R$ .

Рассмотрим автомат Мура  $M$ , обладающий входным алфавитом  $X = \{X_1 X_2 \dots X_n\}$  и выходным  $Y = \{y_1 y_2 \dots y_m\}$ , множеством состояний  $S = \{S_0, S_1, \dots, S_k\}$ , где  $S_0$  — начальное состояние, функцией переходов  $S(t+1) = \varphi(S(t), x(t+1))$ ;  $S_0 = S_{(0)}$  и функцией выходов  $y(t) = f(S(t))$  ( $t \geq 1$ ).

Пусть  $a$  — некоторое входное слово. Через  $F(S, a)$  обозначим последнюю букву в реакции автомата на слово  $a$  при условии, что автомат начинает работу из состояния  $S$ . Автомат  $M$  реализует разбиение  $R$ , если для любого входного слова из множества  $P$  реакция автомата  $M$  определена; и если  $a_1$  и  $a_2$  принадлежат одной компоненте разбиения, то  $F(S_0, a_1) = F(S_0, a_2)$ . Если слова  $a_1$  и  $a_2$  принадлежат различным компонентам разбиения, то  $F(S_0, a_1) \neq F(S_0, a_2)$ .

Из теоремы Клини о регулярных событиях вытекает, что разбиение  $R$  тогда реализуется с помощью конечного автомата  $M$ , когда найдутся такие регулярные события  $T_1, T_2, \dots, T_q$ , что  $T_i \supset O_i$  ( $i = 1, 2, \dots, q$ ) и  $T_i \cap T_j = \emptyset$  при  $i \neq j$  ( $j = 1, 2, \dots, q$ ).

В процессе синтеза автомата  $M$  возникает проблема минимизации данного автомата.

Рассмотрим случай, когда  $P$  состоит из всех непустых слов алфавита  $X$ . Введем обозначение  $Q = P \cup \{e\}$ , где  $e$  — пустое слово. В множество  $P$  введем бинарное соотношение  $a_1 \tau_0 a_2$  тогда и только тогда, если для любого слова  $b \in Q$  имеет место соотношение  $a_1 b$  и  $a_2 b$  принадлежит одной и той же компоненте разбиения  $R$ . Очевидно, что  $a_1 \tau_0 a_2$  есть соотношение эквивалентности.

Пусть автомат  $M$  реализует разбиение  $R$ . В множество состояний  $S_i = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$  введем соотношение  $S_i \tau_1 S_j$  ( $i, j = 1, 2, \dots, k$ ). Тогда и только тогда для любого слова  $b \in Q$  имеем  $F(S_i, b) = F(S_j, b)$ ;  $\tau_1$  является соотношением эквивалентности.

Из вышеприведенных определений непосредственно вытекают следующие утверждения.

Утверждение 1. Состояния  $S_1, S_2$  тогда и только тогда удовлетворяют соотношению  $\tau_1$ , если для любых слов  $a_1$  и  $a_2 \in P$ , удовлетворяющих условиям  $\varphi(S_0 a_1) = S_1$  и  $\varphi(S_0 a_2) = S_2$ , имеет место соотношение  $a_1 \tau_0 a_2$ .

Утверждение 2. Состояния  $S_1$  и  $S_2$  тогда и только тогда удовлетворяют условию  $\tau$ , когда данные состояния эквивалентны в обычном смысле преобразования входных слов в выходные [1—2].

Из утверждений 1, 2 и теории конечных автоматов [1] вытекает

Утверждение 3. Для нахождения минимального автомата, реализующего разбиения  $R$  при условии, что  $P$  состоит из всех непустых слов алфавита  $X$ , к исходному автомату нужно

применить известные методы минимизации Хафтена-Мили или Хола-Ауфенкомппа.

Если  $P$  — множество всех непустых слов под алфавитом  $X$ , тогда все множества  $O_1, O_2, \dots, O_q$  представляют собой регулярные события.

Автомат синтезирован по регулярным событиям и одновременно минимизирован в работе [1]. Задача минимизации значительно усложняется, когда множество  $P$  является собственным подмножеством множества  $Q = \{e\}$ .

В заключение сформулируем нерешенную задачу, представляющую интерес.

**Задача 1.** Найти минимальный автомат Мура, реализующий разбиение множества  $T_m$ .

В данной статье эта задача решена для автомата Мура с заключительными состояниями.

В задаче 1 класс автоматов Мура значительно расширяется. Поэтому можно ожидать, что  $M_{\min}$  содержит меньше состояний, чем  $M_{\min}^{(F)}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Глушков. Синтез цифровых автоматов. М., Физматгиз, 1962.
2. А. Гил. Введение в теорию конечных автоматов, пер. с англ. М., «Наука», 1966.

## К ДИНАМИКЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖАНИЯ РАВНОВЕСИЯ ЧЕЛОВЕКА

*В. А. Внуков, Ю. П. Шабанов-Кушнаренко*

В различных технических системах все чаще встречаются задачи об устойчивости равновесия различных динамических систем под действием неконсервативных нагрузок. В таких системах в качестве неконсервативных нагрузок действуют следящие или циркуляционные силы, которые являются функциями деформации системы и не определяются с помощью стационарного однозначного потенциала.

В связи с космическими исследованиями определенный интерес представляет задача о поддержании равновесия многозвенной вращательной системы, в которой отсутствуют следящие нагрузки.

Рассмотрим случай, когда система подвергнута только консервативному нагружению, а в шарнирах связи действуют восстанавливающие моменты, которые с помощью некоторого управляющего механизма обратной связи управляют положением равновесия системы по определенному закону.

В качестве модели динамической системы выберем многозвенный маятник с неподвижной точкой опоры, звенья которого

(рисунок) могут двигаться только во фронтальной плоскости. Маятник состоит из  $N$  абсолютно жестких тел с различными весами, массами и геометрическими размерами. Во всех шарнирах, последовательно соединяющих звенья системы, действуют восстанавливающие моменты, зависящие от движения звеньев, свойств и структуры системы.

На систему наложены следующие ограничения:

1) движение звеньев — плоское;

2) диссипативными силами и силами трения в шарнирах связи надо пренебречь;

3) распределение масс в пределах каждого звена постоянно и не зависит от взаимного расположения звеньев;

4) считается, что связи между звеньями стационарные, а система голономна.

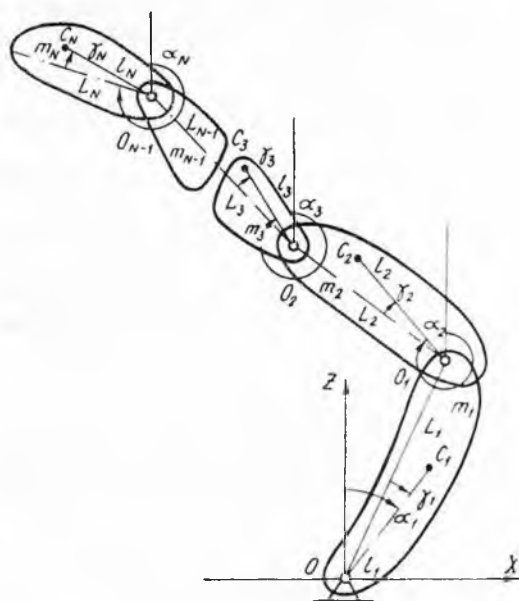


Схема модели.

Зададимся геометрическими и механическими

параметрами звеньев: их массами, моментами инерции относительно соответствующих осей и величинами  $l_k$ ,  $L_k$  и  $\gamma_k$ , смысл которых очевиден из рисунка, где

$XOZ$  — неподвижная система координат;

$O_k$  — ось  $k$ -го шарнира;

$m_k$  — масса  $k$ -го звена;

$\alpha_k$  — обобщенная координата  $k$ -го подвижного звена;

$L_k$  — расстояние между осями  $k$ -го и  $(k+1)$ -го шарниров;

$l_k$  — расстояние от оси  $k$ -го шарнира до центра масс  $k$ -го звена;

$\gamma_k$  — угол, определяющий положение центра масс  $k$ -го звена относительно продольной оси;

$C_k$  — центр тяжести  $k$ -го звена;

$I_k$  — момент инерции  $k$ -го звена относительно  $k$ -го шарнира.

В качестве обобщенных координат выберем углы  $\alpha_k$ . Для каждого звена этот угол образуется вертикалью, проходящей через ось вращения звена, и линией, соединяющей ось вращения с центром масс.

Уравнения движения звеньев системы можно записать с помощью уравнений Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}_k} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha_k} = Q_k \quad (k = 1, 2, \dots, N).$$

Кинетическая энергия системы  $T$  равна сумме кинетических энергий звеньев:

$$T = \sum_{k=1}^N T_k.$$

Для плоского движения по формуле Кенинга

$$T_k = \frac{1}{2} (m_k v_k^2 + I_{c_k} \dot{\alpha}_k^2),$$

где  $v_k$  — скорость центра масс  $k$ -го звена;

$I_{c_k}$  — момент инерции  $k$ -го звена относительно центра масс звена.

Координаты центра масс  $i$ -го звена системы относительно неподвижной системы координат  $XOZ$  запишем в виде

$$X_i = \sum_{j=1}^{i-1} L_j \sin(\alpha_j - \gamma_j) + l_i \sin \alpha_i;$$

$$Z_i = \sum_{j=1}^{i-1} L_j \cos(\alpha_j - \gamma_j) + l_i \cos \alpha_i.$$

Тогда, проведя дифференцирование координат во времени и определив обобщенные силы системы, получаем уравнения движения звеньев в виде

$$\begin{aligned} \sum_{i=k}^N m_i \left[ \sum_{j=1}^{i-1} L_j \ddot{\alpha}_j \cos(\alpha_j - \gamma_j) + l_i \ddot{\alpha}_i \cos \alpha_i \right] & \left[ (1 - \delta_{i-k}) L_k \cos(\alpha_k - \gamma_k) + \right. \\ & \left. + \delta_{i-k} l_k \cos \alpha_k \right] + \\ + \left[ \sum_{j=1}^{i-1} L_j \ddot{\alpha}_j \sin(\alpha_j - \gamma_j) + l_i \ddot{\alpha}_i \sin \alpha_i \right] & \left[ (1 - \delta_{i-k}) L_k \sin(\alpha_k - \gamma_k) + \right. \\ + \delta_{i-k} l_k \sin \alpha_k \left. \right] - L_k \sum_{i=k}^N m_i (1 - \delta_{i-k}) & \left[ \sum_{j=1}^{i-1} L_j \dot{\alpha}_j^2 \sin(\alpha_j - \alpha_k - \right. \\ - \gamma_j + \gamma_k) + l_i \dot{\alpha}_i^2 \sin(\alpha_i - \alpha_k + \gamma_k) & \left. \right] - l_k \sum_{i=k}^N m_i \delta_{i-k} \times \\ \times \left[ \sum_{j=1}^{i-1} L_j \dot{\alpha}_j^2 \sin(\alpha_j - \alpha_k - \gamma_k) + l_i \dot{\alpha}_i^2 \sin(\alpha_i - \alpha_k) \right] & + \\ + I_k \ddot{\alpha}_k = P_k l_k \sin \alpha_k + L_k \sin(\alpha_k - \gamma_k) & \sum_{i=k+1}^N P_i + M_k(t), \end{aligned}$$

где

$$k = 1, 2, \dots, N; \quad \delta_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{при } i = k, \\ 0 & \text{при } i \neq k; \end{cases} \quad (1)$$

$\delta_{ik}$  — символ Кронекера.

Таким образом, поведение многозвенной вращательной системы описывается системой  $N$  нелинейных неоднородных дифференциальных уравнений второго порядка, причем задание определенного закона изменения управляющего момента  $M_k(t)$  каждого звена позволит описать движение звеньев в режиме поддержания равновесия. Очевидно, что регуляторные возможности, заложенные в этом моменте, будут, в свою очередь, зависеть от свойств и структуры объекта управления.

В целях практического применения рассмотрим нашу задачу для случая системы поддержания равновесия человека во фронтальной плоскости. Поскольку нас интересует поддержание равновесия человеком не только при стоянии на месте, но и при ходьбе, то проанализируем более общий случай: равновесие на одной ноге. В таком положении более всего наглядны процессы управления в системе поддержания равновесия человека.

В проекции на фронтальную плоскость тело человека можно представить в виде отдельных крупных и мелких подвижных звеньев: ног, рук, головы, туловища и др. В связи с многозвенностью системы представляется целесообразным *упростить* кинематическую структуру с сохранением ее функциональных возможностей в поддержании равновесия. Значения параметров  $I_k, m_k, l_k, L_k, P_k, \gamma_k$  определяются на основании средних антропометрических данных\*. Поскольку количество дифференциальных уравнений системы (1) меньше числа неизвестных, следует так построить методику исследований, чтобы найти дополнительные условия для решения системы.

Как видно из приведенных уравнений, для моделирования полученной механической системы необходимо знать законы изменения  $\alpha_k(t)$  и  $M_k(t)$ . В целях исследования и анализа динамики системы поддержания равновесия человека была создана экспериментальная установка, обладающая рядом принципиальных особенностей: 1) отсутствием внешнего трения в точке опоры при колебаниях системы; 2) ожесточением режима равновесия для выявления характерных физических особенностей системы; 3) возможностью снятия «чистых» регуляторных характеристик системы и получения более качественной картины процессов управления при равновесии.

Исходя из возможностей нашей методики, проведем линеаризацию полученных уравнений. При этом учтем следующие факторы:

1) звенья системы из-за отсутствия трения совершают малые колебания относительно статических положений равновесия;

\* Н. А. Берштейн. Общая биомеханика. М., РИО ВЦСПС, 1926.

2) отсутствует момент  $M_1(t)$ .

Определяющую роль в поддержании равновесия играет подвижность туловища и нижних конечностей. Тогда модель системы можно представить либо в виде четырехзвенника (неопорная нога, туловище, опорная нога до голеностопного сочленения, стопа опорной ноги), либо как трехзвенник (неопорная нога, туловище, вся опорная нога), либо в виде двух вариантов двухзвенной системы (в первом случае подвижность сохраняется только в тазобедренном суставе неопорной ноги; во втором — лишь в тазобедренном суставе опорной).

Будем считать, что поведение системы поддержания равновесия человека описывается двухзвенной моделью, когда подвижность сохраняется только в голеностопном и тазобедренном сочленениях опорной ноги. Тогда из соотношения (1) для  $N = 2$  получим уравнения

$$\begin{aligned} (I_0 + m_2 L_1^2) \ddot{\alpha}_1 + m_2 L_1 l_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1 + \gamma_1) \ddot{\alpha}_2 - \\ - m_2 L_1 l_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1 + \gamma_1) \dot{\alpha}_2^2 = - P_1 l_1 \sin \alpha_1 + \\ + P_2 L_1 \sin(\alpha_1 - \gamma_1) + M_{1\Sigma}(t); \\ m_2 L_1 l_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1 + \gamma_1) \ddot{\alpha}_1 + I_0 \ddot{\alpha}_2 + \\ + m_2 L_1 l_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1 + \gamma_1) \dot{\alpha}_1^2 = - P_2 l_2 \sin \alpha_2 + M_{2\Sigma}(t), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $M_{1\Sigma} = M_1(t) - M_2(t)$  — суммарный момент мышечных сил в голеностопном сочленении и мышечных сил вышерасположенных звеньев, условно локализованных вокруг оси голеностопного сочленения;  $M_{2\Sigma} = M_2(t)$  — суммарный момент мышечных сил в тазобедренном сочленении и мышечных сил вышерасположенных звеньев, условно локализованных вокруг оси тазобедренного сустава.

Представим угол  $\alpha_k$  в виде  $\alpha_k = \varphi_k^0 + \varphi_k$ , где  $\varphi_k^0$  — постоянная величина, равная начальному значению угла  $\alpha_k$ , а  $\varphi_k$  меняется в малых пределах. Тогда можно принять, что  $\sin \varphi_k = \varphi_k$ ;  $\cos \varphi_k = 1$  и, следовательно,

$$\begin{aligned} \sin \alpha_k &= \sin \varphi_k^0 + \cos \varphi_k^0 \cdot \varphi_k; \\ \cos \alpha_k &= \cos \varphi_k^0 - \sin \varphi_k^0 \cdot \varphi_k. \end{aligned}$$

Учтем, что  $\gamma_1 = 0$  и  $M_1(t) = 0$ . Тогда линеаризованные уравнения системы запишем в виде

$$\begin{aligned} (I_0 + m_2 L_1^2) \ddot{\varphi}_1 + m_2 L_1 l_2 \cos(\varphi_2^0 - \varphi_1^0) \ddot{\varphi}_2 - \\ - (P_1 l_1 + P_2 L_1) (\varphi_1^0 + \varphi_1) = - M_2(t); \\ m_2 L_1 l_2 \cos(\varphi_2^0 - \varphi_1^0) \ddot{\varphi}_1 + I_0 \ddot{\varphi}_2 + \\ + P_2 l_2 (\sin \varphi_2^0 - \cos \varphi_2^0 \cdot \varphi_2) = M_2(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Момент  $M_2(t)$  является входной величиной для объекта управления в системе поддержания равновесия. Посредством этого момента реализуется управляющее воздействие центральной нервной системы. В свою очередь, изменение момента  $M_2(t)$  проявляется в трансформации реакции опоры во времени  $R(t)$ . В таком случае дополнительное условие для решения системы (3) будем искать в виде зависимости

$$M_2(t) = f(R). \quad (4)$$

Найденное условие (4) позволит проверить и уточнить предлагаемую двухзвенную модель объекта управления системы поддержания равновесия человека.

## ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЛУХА

*Г. С. Еремин*

При исследовании слуховой системы методами психофизики на вход анализатора необходимо подавать звуковые посылки с определенными физическими параметрами. Обычно требуется варьировать длительность звукового сигнала, продолжительность паузы между звуками (если предъявляется пара сигналов), форму переднего и заднего фронтов посылки. Регулирование последнего параметра связано со щелчками, возникающими в телефонах испытуемого при резком включении и выключении сигналов.

Известны переключательные схемы, в которых форма фронтов прямолинейна [1] или имеет вид экспоненты [2]. В работе [3] предлагается использовать фронты, совпадающие по форме с полупериодом синусоидальной волны. Это позволит уменьшить длительность фронтов звуковой посылки при значительном ослаблении щелчков включения.

В настоящей работе предлагается устройство, позволяющее изменять по вышеуказанному закону форму фронтов звуковых посылок. Путем незначительных изменений в приводимой ниже функциональной схеме можно задавать произвольным образом закон изменения формы фронтов.

Центральным блоком устройства является attenuator, управляемый напряжением. При конструировании attenuатора использовались схемные решения, описанные в работах [4, 5]. На рис. 1 приведена принципиальная схема этого блока. На первом транзисторе  $ПТ1$  собран фазоинвертор с регулируемой отрицательной обратной связью. Включение в схему полевого транзистора  $ПТ2$  (тип КП102Е) позволило ликвидировать броски эмиттерного тока первого триода, связанные с резкими перепадами в осциллограмме управляющего напряжения  $U_{упр}$ . Третий транзистор выполняет роль сумматора; третий каскад (транзистор  $ПТ4$ ) — усили-

тельный. Для уменьшения частотных искажений во всех каскадах использованы высокочастотные транзисторы типа П416.

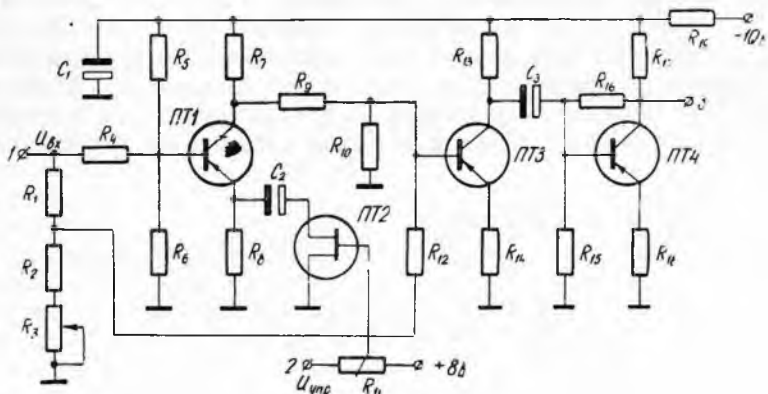


Рис. 1.

Настройка аттенюатора осуществляется следующим образом. При заземленной клемме 2 ( $U_{упр} = 0$ ) триод ПТ2 устанавливается движком потенциометра  $R_{11}$  на грани запаривания. В этом случае переменное напряжение на коллекторе ПТ1 при подаче звукового сигнала  $U_{вх}$  минимально. Затем при номинальном входном напряжении  $U_{вх} = 1$  в потенциометром  $R_3$  добиваются полного отсутствия переменного напряжения на выходе (клемма 3).

На рис. 2 представлена зависимость эффективного значения выходного напряжения от управляющего при номинальном входном напряжении. Из графика видно, что в довольно большом диапазоне напряжений ( $U_{упр} = 0 \div 4$  в) соблюдается хорошая линейность. Действительно, самое узкое место в проведении психофизического эксперимента связано с измерением акустических параметров у мембраны головного телефона испытуемого. Например, погрешность при измерении звукового давления с помощью искусственного уха обычно не меньше 2—3 дБ [6].

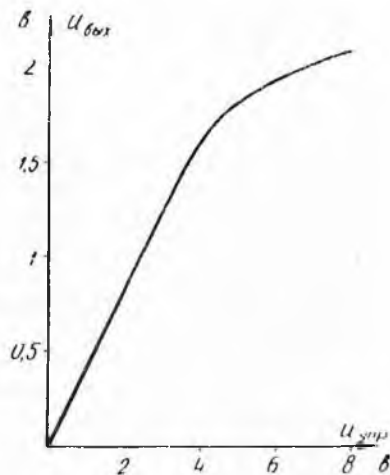


Рис. 2.

Функциональная схема всего устройства изображена на рис. 3, временная диаграмма его работы — на рис. 4. Схема состоит из задающего генератора синусоидальных колебаний ГЗ-34,

выход которого подключен к фиксатору уровня  $\PhiУ$  и усилителю-ограничителю  $УО$ . Выход ограничителя подается в схему управления, где по запускающему импульсу генератора одиночных импульсов  $ГОИ$  вырабатываются потенциалы, управляющие двухвходной сборкой  $СБ1$  (логический элемент ИЛИ) и двухвходной схемой совпадения  $СП1$  (логический элемент И). Один из входов  $СП1$  подключен к выходу фиксатора уровня  $\PhiУ$ , а выход подается на сборку  $СБ1$ . На выходе последней формируется

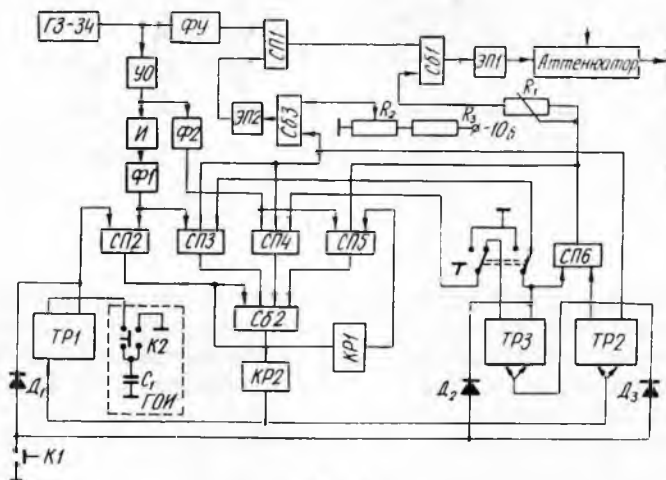


Рис. 3.

сигнал определенной формы. Эмиттерный повторитель  $ЭП1$  служит для понижения выходного сопротивления. Кроме генератора одиночных импульсов, в схему управления входят триггеры  $Тр1$  —  $Тр3$  (два последних включены по схеме суммирующего счетчика), мультивибраторы  $КР1$ ,  $КР2$ , схемы совпадения  $СП2$  —  $СП6$ , сборки  $СБ2$  —  $СБ3$ , эмиттерный повторитель  $ЭП2$ , инвертор  $И$ , формирователи  $\Phi1$ ,  $\Phi2$ .

В зависимости от положения тумблера  $Т$  схема управления может работать в двух режимах. Рассмотрим работу устройства, если тумблер  $Т$  включен так, как показано на рис. 3. Синусоидальное напряжение задающего генератора, настроенного на определенную частоту и непрерывно работающего (рис. 4, а), преобразуется усилителем-ограничителем  $УО$  в прямоугольные колебания (рис. 4, б).

С помощью инвертора  $И$  и формирователей  $\Phi1$ ,  $\Phi2$  в схеме управления постоянно функционируют две последовательности остроконечных импульсов. Импульсы одной из последовательностей возникают на выходе ячейки  $\Phi1$  по окончании каждой отрицательной полуволны синусоиды задающего генератора, импульсы

другой последовательности появляются на выходе ячейки  $\Phi 2$  в начале каждой отрицательной полуволны (рис. 4, *г* и *д*).

В исходном состоянии все триггеры находятся в нулевом положении (за нулевое состояние условно принимается высокий потенциал на левом выходе триггера). Это достигается подачей импульса гашения перед началом работы (оператор нажимает кнопку  $K1$ ). Тогда по меньшей мере на одном входе каждой из схем совпадения потенциал будет нулевым, поэтому на выходе эмиттерного повторителя ЭП1 напряжение также отсутствует.

Выходной сигнал вышеупомянутой формы формируется на выходе ячейки ЭП1 при замыкании кнопки  $K2$ . При этом триггер  $Tr1$  переключается в единичное положение (рис. 4, *е*), очередной импульс с ячейки  $\Phi 1$  проходит схему совпадения СП2 и срабатывают оба мультивибратора. Кипп-реле КР1, осциллограмма выходного напряжения которого представлена на рис. 4, *ж*, снимет подпор еще с одного входа схемы СП5; длительность импульса этого мультивибратора выбирается большей, чем продолжительность периода синусоиды. По заднему фронту импульса КР2, длительность которого равна одной четверти периода

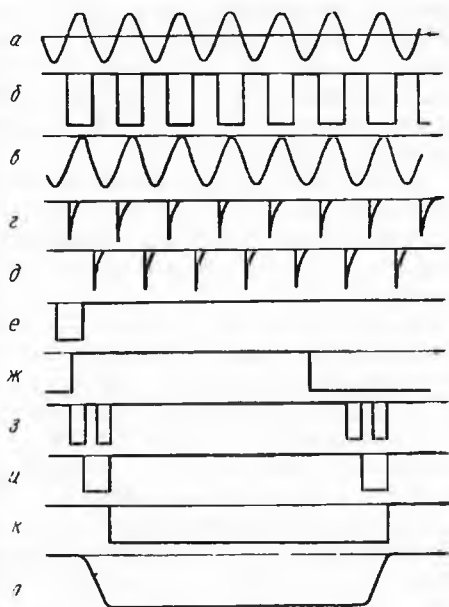


Рис. 4.

синусоиды (рис. 4, *з*), триггер  $Tr1$  сбрасывается в нулевое состояние, а в счетчик записывается код «01» (триггер  $Tr2$  устанавливается в единичное положение). На рис. 4, *и*, *к* приведены осциллограммы правых выходов триггеров  $Tr2$  и  $Tr3$  соответственно. В этом случае появятся высокие напряжения на нижнем входе схемы совпадения СП1 и на двух входах схемы СП4. На выходе СП1 и, следовательно, на выходе сборки СБ1 возникнет напряжение, совпадающее с выходным напряжением фиксатора уровня  $\Phi У$ . Таким образом формируется передний фронт выходного импульса (рис. 4, *л*). Очередной импульс с выхода ячейки  $\Phi 2$ , пройдя схему совпадения СП4 и сборку СБ2, вторично запустит мультивибратор КР2. По заднему фронту импульса КР2 в счетчике установится код «10» (триггеры  $Tr2$  и  $Tr3$  изменят свое состояние), вследствие чего на нижнем входе сборки СБ1 и соответ-

венно на выходе ячейки ЭП1 зафиксирован высокий потенциал. Попутно снимается напряжение на нижнем входе схемы СП1. Длительность вершины выходного сигнала определяется длительностью импульса мультивибратора КР1. По окончании импульса этого кипп-реле на правом входе схемы совпадения СП5 устанавливается высокое напряжение. Тогда очередной импульс с формирователя Ф2, пройдя ячейки СП5 и СБ2, в третий раз запустит мультивибратор КР2. Спустя некоторое время, равное длительности четверти периода синусоиды, в счетчик добавится еще одна единица, установится код «11». При этом снимутся подпоры со среднего входа ячейки СП5 и с нижнего входа ячейки СБ1. Появится высокий потенциал на нижнем входе схемы СП1 и на двух входах схемы СП3. Выходное напряжение ячейки ЭП1 начнет уменьшаться (рис. 4, л), повторяя по форме сигнал с фиксатора уровня ФУ.

В четвертый раз кипп-реле КР2 сработает по импульсу с ячейки Ф1, который пройдет схему совпадения СП3 и сборку СБ2. По окончании действия четвертого импульса мультивибратора КР2 триггеры счетчика сбросятся в нулевое положение и со схем совпадения СП1 и СП3 снимутся подпоры. К этому моменту напряжение на выходе ячейки ФУ упадет до нуля, поэтому переключения в схеме управления, вызванные изменением кода в счетчике, не приведут к скачку напряжения на выходе эмиттерного повторителя ЭП1. Цикл окончен.

Чтобы получить новый сигнал, нет необходимости предварительно подавать импульс гашения, так как все триггеры установлены в нулевое положение.

Для регулирования длительности выходных сигналов, которое, очевидно, будет кратно периоду синусоиды задающего генератора, достаточно изменить длительность импульса мультивибратора КР1. Длительность фронтов регулируется изменением частоты синусоидальных колебаний и длительности мультивибратора КР2.

Если изменить положение тумблера Т, в осциллограмме выходного импульса не будет плоской вершины. Действительно, в этом случае триггер Тр3 жестко зафиксируется в нулевом положении, всегда на одном из входов схем совпадения СП4 и СП5, по меньшей мере, будет нулевой потенциал, а ячейка СП3 преобразуется в двухвходовую схему совпадения. В результате схема управления станет реагировать только на последовательность импульсов с формирователя Ф1. Очевидно, в одном цикле мультивибратор КР2 сработает дважды, а после второго импульса с КР2 в счетчике установится код «00».

Переменное сопротивление  $R_1$  предназначено для ликвидации щелчков, возможных вследствие незначительных перепадов напряжений на выходе ячейки ЭП1, когда в счетчике устанавливается код «10».

С помощью потенциометра  $R_2$  и резистора  $R_3$ , сборки СБ3 и эмиттерного повторителя ЭП2 снимаются возможные перепады

напряжения в осциллограмме выходного импульса вблизи нуля (в моменты, когда триггер  $Tr2$  устанавливается в нулевое положение).

В схеме управления использованы стандартные ячейки триггера и мультивибраторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Цвикер, Р. Фельдкеллер. Ухо как приемник информации, изд. 2-е. М., «Связь», 1971.
2. С. Ф. Вайтулевич, В. А. Кожевников, А. П. Лебедев, В. И. Сорока. Электронный ключ с малым уровнем помех. «Приборы и техника эксперимента», 1965, № 5.
3. Г. С. Еремин. Представление звуковых сигналов. Сб. «Проблемы бионики», вып. 9. Изд-во Харьковск. ун-та, 1972.
4. Патент Японии. «Бюллетень патентных заявок Японии», сер. 6, вып. 1241, № 44-363 (1969).
5. Патент Японии. «Бюллетень патентных заявок Японии», сер. 6, вып. 1485, № 45-14001 (1970).
6. В. И. Долгопольская. Искусственное ухо, учитывающее активную составляющую сопротивления естественного уха. «Вопросы радиоэлектроники», сер. XI. Техника проводной связи», вып. 1. М., 1964.

### К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТОЧНОСТИ И ИНФОРМАТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДЕЛЕЙ СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ ЧЕЛОВЕКА

*В. В. Тищенко*

Математические модели сенсорной системы человека удобно исследовать с помощью ЭВМ [1], что дает возможность проводить эксперименты над описанными закономерностями функционирования анализаторов более совершенными средствами.

Однако правильность выбора ЭВМ и грамотное построение структурных схем электронных моделей еще не гарантируют совпадения результатов решения с реальными реакциями анализатора и соответствующих ему математических моделей. Это может быть объяснено аппаратурной погрешностью электронных моделей, их определенными информационными возможностями, временем запаздывания реакции и другими свойствами, обусловленными параметрами операционных устройств ЭВМ, которые и искажают результат.

Рассмотрим эти вопросы более подробно. Найти общую погрешность решения электронной модели весьма сложно, и этот процесс до конца не определен. Погрешность решения на АВМ можно находить путем составления системы интегральных характеристик, связанных с абсолютной погрешностью операций [2]. Однако проблема усложняется из-за возрастания структуры модели погрешностей по сравнению с моделью уравнения и за счет

определения абсолютной погрешности операционных устройств, особенно для нелинейных структур.

В настоящей работе предлагается способ поиска минимальной погрешности решения путем уменьшения общей аппаратурной погрешности системы посредством изменения параметров и структуры схемы.

Чтобы точно и быстро решить уравнения сенсорной системы, необходимо использовать ЦИМ или АЦМ как наиболее эффективные в данном случае [3]. Модели, построенные на этих машинах, состоят из отдельных операционных устройств, выполняющих ту или иную операцию. Точность выполнения операции отдельным блоком может быть охарактеризована функционально-относительной погрешностью, зависящей от амплитуды и частоты входного сигнала:

$$\delta = \varphi[U, f], \quad (1)$$

где  $\delta$  — относительная погрешность;  $\varphi(U, f)$  — функция погрешности.

Определение такой зависимости для каждого операционного устройства не вызывает больших затруднений и в некотором смысле совпадает с понятием добротности [4]. Следовательно, работу каждого операционного устройства можно охарактеризовать относительной погрешностью в каждой точке выполнения операции над входным сигналом.

Пусть математическая модель сенсорной системы человека описана оператором, ставящим в однозначное соответствие каждому входному сигналу  $X$  выходной сигнал  $Y$ :

$$Y = F(x). \quad (2)$$

Тогда оператор электронной модели, выполняющий ту же функцию, вносит погрешность в решение и может быть описан в виде

$$Y^* = F(x) \pm F_0, \quad (3)$$

где  $F_0$  — общая погрешность решения.

В общем случае оператор  $F$  и порождаемый им оператор погрешностей  $F_0$  могут быть дифференциальными, интегральными или алгебраическими, состоящими из простейших операторов, которые описываются алгебраическими операциями. Как правило,  $F$  — кусочно-линейный оператор (кусочно-ступенчатый), определяемый характером восполнения операций на машинах.

Предположим, что  $f_i$  — элементарный оператор, выполняющий одну операцию. Тогда результат операции может быть описан в виде

$$Z^* = Z + \Delta Z = f(x) \pm f_0(S), \quad (4)$$

где  $f(X)$  — операция над входным сигналом;

$f_0(S)$  — погрешность операции;

$S$  — внутренний параметр операционного устройства;

$\Delta Z$  — абсолютная погрешность операции.

Очевидно, что абсолютная погрешность операции  $\Delta Z = f_0(S)$ .

Проведем преобразования, определив возмущение на входе устройства, вызывающее абсолютную погрешность  $\Delta Z$ :

$$\Delta X = f_0^{-1}(\Delta Z), \quad (5)$$

где  $\Delta X$  — приведенное к входу возмущение;  $f_0^{-1}$  — обратный оператор.

Тогда справедливо  $Z = f(X \pm \Delta X)$  и  $\Delta Z = 0$ , а из (5) следует  $\Delta Z = Z^* - Z = f_0(\Delta X)$ . Следовательно, абсолютную погрешность операции можно считать функцией, зависящей от приведенного к входу возмущения  $(\Delta X)^*$ .

Рассмотрим более сложный оператор погрешностей  $F_0$  — линейный в общем случае и зависящий от внутренних параметров  $S$  (неточность установок и погрешности элементов). Тогда  $\Delta Y = F_0(S)$ . Преобразуем к входу через обратный оператор:

$$\Delta m = F_0^{-1}(\Delta Y),$$

где  $\Delta m$  — приведенное к входу возмущение.

Если считать, что  $\delta = \frac{\Delta m}{m_{\max}}$  или  $\Delta m = \delta m_{\max}$ , то  $\delta m_{\max} = F_0^{-1}(\Delta Y)$  или  $\Delta Y = m_{\max} F(\delta)$ , где  $m_{\max} = \text{const}$ . Следовательно, если применить оператор преобразования  $F$  к относительной погрешности  $\delta$ , то получим некую погрешность решения модели

$$\sigma = F_0(\delta). \quad (6)$$

Практика моделирования показывает, что в ходе определения общей погрешности решения (реакций модели) полезно придерживаться следующего порядка.

1. Определять относительную погрешность каждого операционного устройства как функцию частоты и амплитуды входного сигнала.

2. Если найдены основные операционные характеристики (относительные погрешности) устройств, входящих в группу электронной модели  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ , то по физическим критериям их можно разделить на погрешности линейных  $\delta_{\text{л}}$  (сумматоров, интеграторов, блоков умножения на константу) и нелинейных  $\delta_{\text{н}}$  (множительных устройств, функциональных преобразователей, вариаторов коэффициентов). В группе выделяются блоки с худшими параметрами.

3. Если оператор математической модели нелинеен, то из уравнения необходимо выделить линейную часть. Затем, подставив в качестве независимой переменной в обе части  $\delta_{\text{л}}$  и  $\delta_{\text{н}}$ , решим уравнения погрешностей.

Если общая погрешность решения мала или равна нулю, то, очевидно, график решения будет параллелен оси времени или станет сливаться с ней. Во всех других случаях необходимо изменить параметры структуры модели и добиться уменьшения погрешности.

\* Рассматриваются только систематические погрешности.

Таким образом, с помощью разработанных мер удается увеличить и оценить точность функционирования электронной модели.

Рассмотрим проблему времени реакции моделей. Как и в предыдущем вопросе, здесь полезно выделить реакцию во времени математической модели как идеальную и реакцию электронной модели, обладающей погрешностью времени реакции. Под погрешностью времени реакции моделей будем понимать несоответствие времени реакций математической и электронной моделей. Определить такой параметр необходимо потому, что несоответствие времени реакции моделей приводит к дополнительным погрешностям по амплитуде, частоте и фазы входного сигнала. Поэтому оценим погрешность во времени реакций модели отношением

$$S = \frac{\tau_m}{\tau_э},$$

где  $S$  — погрешность времени реакции;

$\tau_m$  — время реакции математической модели (анализатора человека);

$\tau_э$  — время реакции электронной модели.

Погрешность реакций во времени может принимать значения  $S < 1$ ,  $S > 1$  и  $S = 1$ . Реакции моделей во времени будут идентичны при  $S = 1$ , в остальных случаях необходимо корректировать постоянное время электронной модели. В приведенном соотношении время реакции математической модели (анализатора человека) определяется экспериментально, а время реакции электронной модели можно установить из передаточной функции  $W(p)$  структуры с учетом распределенной емкости утечки и монтажа [5].

Рассмотрим информативность моделей. Этот параметр модели необходим для оценки количества информации моделей в целях определения степени достоверности реакции электронной модели по сравнению с математической. Количество информации непрерывного сигнала, как правило, определяется из выражения

$$I(X_k, Y_i) = \log \frac{P\left(\frac{Y_i}{X_k}\right)}{P(Y_i)},$$

где  $P$  — условная вероятность событий  $Y_i$ ,  $X_k$  и их соотношения;

$Y_i$  — выходной сигнал;

$X_k$  — входной сигнал;

$I(X, Y)$  — количество информации в событии  $Y_i$  по отношению к  $X_k$ , а всякая непрерывная функция на входе и выходе модели может быть представлена в виде

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \bar{f}(t_k) \frac{\sin 2\pi F_0 (t - t_k)}{2\pi F_0 (t - t_k)},$$

где  $f(t_k)$  — мгновенное значение сигнала;  
 $F_0$  — высшая гармоника, ограничивающая спектр;  
 $(t - t_k)$  — интервал времени.

Тогда под информативностью электронной модели будем понимать отношение при одинаковом спектре входного сигнала ( $X_k$ ):

$$r = \frac{I(X, Y)_M}{I(X, Y)_Э},$$

где  $r$  — информативность моделей;  
 $I(X, Y)_M$  — количество информации математической модели при  $X_k$  на входе;  
 $I(X, Y)_Э$  — количество информации электронной модели при  $X_k$  на входе.

Обычно  $I(X, Y)_M > I(X, Y)_Э$ . Это объясняется большей ограниченностью полосы частот электронной модели по сравнению с математической.

Итак, определение указанных параметров электронной модели и сравнение их с математическими полезно при исследовании моделей сенсорной системы человека техническими средствами для установления факта правильного отражения законов функционирования сенсорных анализаторов с помощью ЭВМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Мурашко. О технической реализации алгоритмов переработки информации в зрительной системе человека. Сб. «Проблемы бионики», вып. 2. Изд-во Харьковск. ун-та, 1969.
2. С. Эттерман. Математические машины непрерывного действия. М., Гостехтеоретиздат, 1956.
3. В. В. Тищенко. К вопросу об исследовании моделей вибрационного анализатора на ЭВМ. Сб. «Проблемы бионики», вып. 9. Изд-во Харьковск. ун-та, 1972.
4. М. Латенко. Аналоговые множительные устройства. М., «Наука», 1965.
5. Теория автоматического управления. Под ред. А. В. Негушила. М., «Высшая школа», 1968.

## ОБЩИЕ АСПЕКТЫ ОБУЧЕНИЯ РАСПОЗНАВАНИЮ ОБРАЗОВ

### А. М. Пряницкий

Общую задачу распознавания можно сформулировать в следующем виде. Имеется произвольное множество сигналов  $G$ . В этом множестве выбирается конечная система непустых непересекающихся подмножеств  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$ , т. е.  $H_i \subset G$  ( $i = 0, 1, \dots, k-1$ ) и  $H_i \cap H_j = \emptyset$  при  $i \neq j$ , где  $\emptyset$  — пустое множество. Система  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$ , которая удовлетворяет вышеуказанным условиям, называется разбиением множества  $G$ . Разбиение  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  называется полным, если выполняется условие  $G = H_0 \cup H_1 \cup \dots \rightarrow$

$\rightarrow \dots \cup H_{k-1}$ . Множества  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  называются образами, а элементы  $x$  множества  $G$  — изображениями, или представителями образов  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$ . Если  $x \in H_i$  ( $i = 0, 1, \dots, k-1$ ), то будем говорить, что сигнал (или изображение) принадлежит образу  $H_i$ . Множества  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  называются также компонентами разбиения  $R$ . Каждое разбиение  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  можно реализовать с помощью некоторой конечнозначной функции  $f(x)$ , аргумент которой принимает значения из множества  $G$ . Например, для разбиения  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  в роли  $f(x)$  можно использовать функцию  $f(x) = i$ , если  $x \in H_i$  ( $i = 0, 1, \dots, k-1$ ). Заметим, что функция  $f(x)$  тогда и только тогда всюду определена на множестве  $G$ , когда соответствующее разбиение  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  является полным.

Каждая конечнозначная функция  $f(x)$ , где  $x \in G$ , определяет, в свою очередь, некоторое разбиение множества  $G$ . Пусть, например, функция  $f(x)$  принимает значения  $a_0, a_1, \dots, a_{k-1}$ . Тогда разбиение  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  однозначно определяется следующим образом:  $x \in H_i \leftrightarrow f(x) = a_i$  ( $i = 0, 1, \dots, k-1$ ). Таким образом, каждое разбиение  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  можно задать с помощью конечнозначной функции  $f(x)$ , и наоборот: каждая конечнозначная функция  $f(x)$  задает некоторое разбиение.

Проиллюстрируем вышеуказанное на некоторых примерах.

**Пример 1.** Пусть  $G$  — множество действительных чисел. Пусть

$$\begin{aligned} H_0 &= \{x | 0 \leq x \leq 1\}; \\ H_1 &= \{x | -2 \leq x \leq -1\}; \\ H_2 &= \{x | 3 \leq x \leq 5\} \end{aligned} \quad (1)$$

представляет собой неполное разбиение множества  $G$ . Разбиение (1) можно задать с помощью функции

$$f(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq x \leq 1, \\ -1, & \text{если } -2 \leq x \leq -1, \\ 5, & \text{если } 3 \leq x \leq 5. \end{cases}$$

Вообще разбиение (1) можно задать с помощью произвольной функции  $f(x)$  вида

$$f(x) = \begin{cases} a_0, & \text{если } 0 \leq x \leq 1, \\ a_1, & \text{если } -2 \leq x \leq -1, \\ a_2, & \text{если } 3 \leq x \leq 5, \end{cases}$$

где  $a_0, a_1, a_2$  — произвольные, попарно различные между собой действительные числа.

Таким образом, одно и то же разбиение  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  можно задавать с помощью многих функций  $f(x)$ .

Обозначим разбиение  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  через  $R$  и функцию, задающую разбиение  $R$ , — через  $f_R(x)$ . Так как вид значений функции  $f_R(x)$  не является существенным при задании разбиения

$R$ , то будем считать, что  $f_R(x)$  принимает значения  $0, 1, 2, \dots, k-1$  и  $H_i^k = \{x | f_R(x) = i\}$  ( $i = 0, 1, \dots, k-1$ ).

**Пример 2.** Пусть  $G$  — множество трехмерных векторов  $x_1, x_2, x_3$ . Тогда функция

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } |x_1| + |x_2| + |x_3| \leq 1, \\ 1, & \text{если } |2-x_1| + |2-x_2| + |2-x_3| \leq \frac{1}{2}, \\ 2, & \text{если } \max(|3-x_1|, |3-x_2|, |3-x_3|) \leq \frac{1}{3}, \end{cases} \quad (2)$$

задает некоторое разбиение множества  $G$ .

Действительно, из  $|x_1| + |x_2| + |x_3| \leq 1$  вытекает  $|x_i| \leq 1$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Из  $|2-x_1| + |2-x_2| + |2-x_3| \leq \frac{1}{2}$  вытекает, что  $|2-x_i| \leq \frac{1}{2}$ ;  $|2-|x_i|| \leq \frac{1}{2}$ ;  $2-|x_i| \leq \frac{1}{2}$ ;  $|x_i| \geq 2 - \frac{1}{2} = \frac{3}{2}$ ;  $|x_i| - |2| \leq \frac{1}{2}$ ;  $|x_i| - 2 \leq \frac{1}{2}$ ;  $|x_i| \leq 2\frac{1}{2}$ . Таким образом, при  $|2-x_1| + |2-x_2| + |2-x_3| \leq \frac{1}{2}$  имеем  $2\frac{1}{2} \geq |x_i| \geq 1\frac{1}{2}$  ( $i = 1, 2, 3$ ).

При  $\max(|3-x_1|, |3-x_2|, |3-x_3|) \leq \frac{1}{3}$  имеем  $|3-x_i| \leq \frac{1}{3}$ ;  $3-|x_i| \leq \frac{1}{3}$ ;  $|x_i| \geq 2\frac{2}{3}$ ;  $|x_i| - 3 \leq \frac{1}{3}$ ;  $|x_i| \leq 3\frac{1}{3}$ . Таким образом,

при  $\max(|3-x_1|, |3-x_2|, |3-x_3|) \leq \frac{1}{3}$  имеем  $2\frac{2}{3} \leq |x_i| \leq 3\frac{1}{3}$ . Следовательно, множества, определяемые условиями (2), попарно не пересекаются между собой.

Перейдем к постановке задачи распознавания образов. Пусть имеется разбиение  $R$  множества  $G$  и некоторая система  $S$ . В роли последней может выступать человек, ЭВМ или произвольный автомат, а также некоторая система операций (или логических элементов). Задачи распознавания состоят в том, чтобы научить систему вычислять функцию  $f_R(x)$ . Другими словами, систему нужно привести в такое состояние (или так сконструировать ее), чтобы при подаче на вход системы  $S$  сигнала  $x$  из  $G$  она на выходе выдавала бы сигнал  $f_R(x)$  (рис. 1).

Например, пусть  $G$  — множество всех символов, которые могут быть записаны на бумаге. Среди этих символов есть изображающие цифры  $0, 1, 2, 3, \dots, 9$  или буквы  $a, б, в, \dots$ . Задача обучения автоматов распознаванию рукописных цифр и букв является одной из актуальных в теории и практике распознавания образов [1].

Перед тем как обучать систему  $S$  распознаванию образов [2], обратим внимание на следующее. Часто возникает ситуация, когда система  $S$  не может непосредственно воспринимать сигналы множества  $G$ . Например, электронно-вычислительная машина непосредственно воспринимает только дискретные сигналы определенной формы. Поэтому между сигналами  $x$  из  $G$  и системой  $S$  нужно вставить некоторое кодирующее устройство  $KУ$  (рис. 2), реали-

зующее некоторую функцию  $y = \varphi(x)$ . Эта функция должна удовлетворять следующему условию: если  $f_R(x_1) \neq f_R(x_2)$ , то  $\varphi(x_1) \neq \varphi(x_2)$ . Действительно, если бы не выполнялось последнее условие, тогда система, изображенная на рис. 2, не смогла реализовать функцию  $f_R(x)$ . Пусть  $H$  — множество всех значений функции  $\varphi(x)$ , т. е.  $H = \{\varphi(x), x \in G\}$ . Тогда система  $S$  будет уже распознавать не сигналы множества  $G$ , а сигналы множества  $H$ .

В данной работе, не занимаясь построением  $KY$ , станем считать, что множество  $G$  сигналов уже как-то закодировано. В роли сигналов часто будут выступать двоичные наборы  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,



Рис. 1.

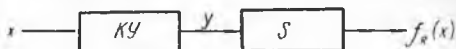


Рис. 2.

где  $x_i \in \{0, 1\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), или  $k$ -значные наборы  $y_1 y_2 \dots y_n$ , где  $y_i \in \{0, 1, 2, \dots, k-1\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Рассмотрим также случаи, когда в роли сигналов выступают действительные числа или их наборы.

При обучении системы  $S$  распознаванию образов разбиения  $R$ , во-первых, функция  $f_R(x)$  заранее задается системе. Кроме того, система  $S$  последовательно обучается распознаванию образов разбиения  $R$ . Это положение — главное в настоящем исследовании. Рассмотрим прежде первое положение.

Что значит задать функцию  $f_R(x)$  системе  $S$ ? Ответ зависит от вида системы  $S$ . Если  $S$  представляет собой электронно-вычислительную машину, тогда значение  $f_R(x)$  считаем некоторой программой, вычисляющей функцию  $f_R(x)$ .

Если  $S$  — испытуемый, тогда  $f_R(x)$  часто задается в виде некоторой формулы. Если же в роли  $S$  выступает некоторый (полный) набор логических элементов, тогда задание  $f_R(x)$  состоит в построении логической схемы, реализующей функцию  $f_R(x)$ .

Перейдем к главному аспекту теории распознавания — к обучению системы  $S$  распознаванию образов разбиения  $R$ . В ходе обучения системе  $S$  не задается готовая схема вычисления функции  $f_R(x)$ , а система сама строит схему вычисления данной функции. Для этого система  $S$  должна получать некоторую информацию о функции  $f_R(x)$  (или о соответствующем разбиении  $R$ ). Последняя бывает двух видов: а) априорная информация о функции  $f_R(x)$ ; б) значение функции  $f_R(x)$  на некотором подмножестве точек множества  $G$ .

Априорная информация о  $f_R(x)$  может проявляться в различных формах. Например, можно заранее знать, что  $f_R(x)$  принимает не более чем  $k$  значений. Могут быть также заблаговременно известны некоторые свойства множества разбиения  $R$ . Априорная информация позволяет на основании знания значений функции  $f_R(x)$  в одних точках узнать значения этой функции (или, по крайней мере, достаточно близко аппроксимировать ее) в других

точках. Роль априорной информации станет очевидной из рассмотрения примеров обучения распознаванию образов.

Основной информацией при обучении системы  $S$  являются значения функции  $f_R(x)$  в некоторых точках. Последнее означает, что при обучении данной системе  $S$  в некоторые моменты времени задаются некоторые сигналы  $x$  из  $G$  и значения  $f_R(x)$ , т. е. задаются пары  $(x, f_R(x))$ . На основании этой информации (с использованием и априорной) система  $S$  строит схему вычисления  $f_R(x)$ . При создании схемы вычисления  $f_R(x)$  система  $S$  может придерживаться одной из следующих методик.

1. Сначала запоминаются все пары  $(x, f_R(x))$ , которые задаются системе в процессе обучения. Это запоминание заканчивается, когда уже не поступают новые пары  $(x, f_R(x))$ . После этого система  $S$ , используя априорную информацию и все полученные ею обучающие пары  $(x, f_R(x))$ , переходит к построению схемы, вычисляющей функцию  $f_R(x)$  (или схемы, аппроксимирующей функцию  $f_R(x)$ ).

2. Система  $S$  строит последовательность функций  $f_0, f_1, \dots, f_n$ , которые все больше и больше должны приближаться к функции  $f_R(x)$ . Функции  $f_0, f_1, \dots, f_n$  строятся следующим образом. Сначала  $S$  воспринимает некоторую (конечную) совокупность обучающих пар  $H_0$ . На основании  $H_0$  (с приложением априорной информации) система  $S$  строит функцию  $f_0$ . Функция  $f_0$  должна совпадать с  $f_R(x)$  на тех  $x$ , которые входят в обучающие пары  $H_0$ , т. е. если  $(x, f_R(x)) \in H_0$ , то  $f_0(x) = f_R(x)$ . Далее  $S$  вновь воспринимает некоторую конечную совокупность обучающих пар  $H_1$  и на основании  $H_1$  и  $f_0$  с помощью некоторого оператора  $O$  строит новую функцию  $f = O(f_0, H_1)$ . Вообще если система  $S$  построила функцию  $f_i$  и восприняла на  $(i + 1)$ -этапе некоторую новую обучающую совокупность пар  $H_{i+1}$ , то  $f_{i+1} = O(f_i, H_{i+1})$ .

При описании этой методики нужно уточнить: а) каким условиям должен удовлетворять оператор  $O$ ?; б) когда необходим переход от  $f_i$  и  $H_{i+1}$  (другими словами, каким условиям должен удовлетворять совокупность  $H_{i+1}$ , чтобы можно было принять решение о переходе от  $f_i$  к  $f_{i+1}$  по оператору  $O(f_i, H_{i+1})$ )?

Вообще говоря, эти вопросы можно полностью уточнить при построении конкретного алгоритма обучения распознаванию. К оператору разумно предъявить следующие требования.

1. Функции  $f_0, f_1, \dots, f_n$ , получаемые с помощью такого оператора, по возможности должны быть проще.

2. При увеличении  $i$  функция  $f_i$  по возможности точнее должна аппроксимировать  $f_R(x)$ .

3. Переход от  $f_i$  к  $f_{i+1}$  по оператору  $O$  по возможности должен быть простым и не громоздким. Другими словами, хотелось бы, чтобы при переходе от  $f_i$  к  $f_{i+1}$  схема, вычисляющая функцию  $f_i$ , не менялась коренным образом.

Рассмотрим вопрос б). Одним из простейших является случай, когда  $H_i$  представляет собой на каждом этапе одноэлементную

совокупность. Другими словами, в этом случае система  $S$  последовательно воспринимает обучающие пары  $y_i = (x_i, f_R(x_i))$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). В нулевой момент времени система  $S$  обладает некоторой функцией. При получении пары  $y_0$  функция  $f_0$  по некоторому оператору  $O$  перестраивается в функцию  $f_1 = O(f_0, x_1)$ , и вообще  $f_i$  после получения пары  $y_{i+1}$  перестраивается в функцию  $f_{i+1} = O(f_i, x_{i+1})$ . При построении  $f_{i+1}$  на оператор  $O$  можно наложить следующее условие: если  $f_i(x_{i+1}) = f_R(x_{i+1})$ , то  $f_i = f_{i+1}$ . Это условие свидетельствует о том, что если система  $S$  с помощью функции  $f_i$  на новом аргументе  $x_{i+1}$  распознает правильно, тогда нет необходимости изменять функцию  $f_i$ . В последнем случае при выполнении условия  $f_i(x_{i+1}) = f_R(x_{i+1})$  обучающая пара  $y_{i+1} = (x_{i+1}, f_R(x_{i+1}))$  никак не реагирует на систему  $S$ , т. е.  $S$  этой пары не запоминает. Последнее очень важно для экономии памяти системы  $S$ .

Обучение системы  $S$  по второй методике считается законченным, если после некоторого этапа  $t$  выполняются условия  $f_t(x_{t+1}) = f_R(x_{t+1})$ ,  $f_t(x_{t+2}) = f_R(x_{t+2})$ , т. е. система  $S$  уже правильно распознает подаваемые на ее вход сигналы  $x$  из множества  $G$ .

Рассмотрим достоинства и недостатки вышеуказанных методик распознавания. Для теории распознавания основной является вторая методика. При использовании первой методикой в конце процесса распознавания получается некоторое множество  $H$  обучающих пар. На основании этого множества (и априорной информации) строится схема, вычисляющая функцию  $f_R(x)$ . Сначала может показаться, что первая методика представляет собой одну из форм задания системе  $S$  функции  $f_R(x)$ . Но в действительности системе  $S$  уже в готовом виде задается некоторая схема вычисления  $f_R(x)$ . Иными словами, при задании от системы  $S$  требуется, чтобы она работала по готовой схеме. В случае применения первой методики обучения системе  $S$  не задается готовая формула; наоборот, система  $S$  сама по множеству обучающих пар должна построить схему, вычисляющую (или аппроксимирующую) функцию  $f_R(x)$ .

Первая методика имеет следующие достоинства:

- а) запоминаются все обучающие  $H$  пары;
- б) схема, вычисляющая функцию  $f_R(x)$ , строится в конце этапа распознавания.

Последнее является некоторым преимуществом первой методики распознавания. Действительно, во второй методике затрачиваются усилия на построение многих функций  $f_0, f_1, \dots, f_n$ , в то время как в первой методике строится только одна функция. Однако первая методика имеет и существенные недостатки.

1. Множество  $H$  может стать настолько громоздким, что не хватит никакой реальной памяти для запоминания всех элементов этого множества. Если же  $H$  бесконечно (что бывает часто), то первая методика вообще не применима.

2. Если у системы  $S$  все-таки хватило памяти для того, чтобы запомнить все элементы множества  $H$ , то множество  $H$  может быть еще настолько громоздким, что по нему трудно или даже невозможно построить более-менее простую схему вычисления  $f_R(x)$ .

Вышеуказанное позволяет сделать заключение, что первую методику стоит применять в том случае, если априори известно, что множество  $H$  не является громоздким. Например, если известно, что все сигналы из  $H$  представляют собой пятиразрядные двоичные наборы  $x_1x_2x_3x_4x_5$ , где  $x_i \in \{0, 1\}$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ), тогда число элементов множества  $H$  не превышает  $2^5 = 32$ . В этом случае можно применять первую методику распознавания.

Достоинства второй методики распознавания следующие.

1. Система  $S$  в любой момент готова к распознаванию образов. Точнее говоря, система  $S$  может распознавать после построения функции  $f_0$ . Правда, это распознавание будет тем лучше, чем больше индекс в функции  $f_i$ .

2. При второй методике распознавания система  $S$  не обязательно должна помнить все обучающие пары.

3. Схема, распознающая функцию  $f_R(x)$ , строится последовательно с помощью построения функций  $f_0, f_1, \dots, f_n$ . Особенно важным является второе достоинство. Система  $S$  может получить на вход сколько угодно обучающих пар, но это не угрожает памяти системы  $S$  переполнением. Точнее говоря, в случае использования второй методики, система не запоминает все обучающие пары, а лишь те из них, которые в некотором смысле являются существенными.

К недостаткам второй методики нужно отнести следующие: а) система  $S$  в процессе обучения может забывать ранее поданные на вход обучающие пары или вообще не реагировать на некоторые обучающие пары; б) первые функции  $f_0, f_1, \dots, f_n$  могут быть еще весьма далеки от функции  $f_R(x)$ ; это может вызвать необходимость построения очень долгой последовательности  $f_0, f_1, \dots, f_i, \dots$ , пока  $f_i$  не станет близкой к  $f_R(x)$ .

Недостаток б) ликвидируется удачным выбором оператора  $f_{i+1} = O(f_i, H_{i+1})$ . Этот выбор в некоторых случаях можно осуществить на основании априорной информации или полученной до некоторого момента времени совокупности обучающих пар, а также перебором в некотором множестве операторов. Из-за недостатка а) при обучении системы  $S$  может возникнуть необходимость повторения, т. е. многократной подачи в различные моменты времени одной и той же обучающей пары. Последнее может затянуть процесс обучения.

Необходимо выбирать между двумя противоположностями: а) если нужно экономить память системы  $S$ , процесс обучения может стать длинным; б) если желательно быстро обучить систему  $S$ , тогда данную систему надо снабдить более или менее обширной памятью.

В большинстве случаев благодаря гибкости и практичности вторая методика преимуществ первой. Строго говоря, первую методику можно считать некоторым крайним случаем второй.

#### ВЫВОДЫ

1. Задача распознавания сводится к тому, чтобы обучить систему  $S$  вычислять некоторую функцию  $f_R(x)$ . Последняя определяется на множестве  $G$  и принимает конечное число значений. Функция  $f_R(x)$  однозначно представляет некоторое разбиение  $R$ . Функции  $f_R(x)$  и  $\varphi_R(x)$  считаются одинаковыми, если представляют одно и то же разбиение.

2. При обучении система  $S$  воспринимает серию обучающих пар  $(x_1, f_R(x_1)), (x_2, f_R(x_2)), \dots, (x_n, f_R(x_n))$  и на основании этих пар с применением априорной информации о функции  $f_R(x)$  система должна построить схему, вычисляющую функцию  $f_R(x)$  (или некоторое ее приближение).

3. При обучении возникают следующие проблемы: а) экономия памяти системы  $S$ ; б) быстрдействие обучения системы  $S$  (т. е. необходимость как можно быстрее обучить систему  $S$ ); в) построение вычисляющей функции схемы, чтобы по некоторым важным параметрам она была оптимальной (например, по объему, быстрдействию, надежности и т. д.).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Аркадьев, Э. М. Браверман. Обучение машины классификации объектов. М., «Наука», 1971.
2. Н. Нильсон. Обучающиеся машины, пер. с англ. М., «Мир», 1967.

### ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ЗРИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗАТОРА

*Ю. П. Бугай, В. А. Бахтигозин, В. Г. Червов*

Нейрон — основная структурная и функциональная единица нервной системы на клеточном уровне. На уровне ансамблей нервных клеток такой единицей является рецептивное поле. Обнаружены рецептивные поля со сложной конфигурацией возбуждающих и тормозящих связей. Эти рецептивные поля выполняют роль так называемых детекторов пространственно-временных признаков сигналов. Детекторы особо чувствительны к тем или иным элементам формы изображений и к их изменению во времени. Если детекторы реагируют на некоторое определенное свойство конфигурации стимулов только в определенном месте поля зрения, то они называются детекторами локальных свойств [1].

В настоящей работе описана линейная физическая модель, предназначенная для имитации пространственно-временных свойств рецептивных полей с любой формой зон возбуждения и торможения. В таблице схематически изображены некоторые типичные для зрительной системы формы рецептивных полей [2, 3]. Во втором столбце таблицы указаны стимулы, на которые соответствующие рецептивные поля реагируют максимально. Из анализа пространственных и временных особенностей рецептивных полей

Тип	Форма рецептивно-го поля	Оптимальный стимул	Диафрагмы	
			$\alpha$	$\beta$
1		Светлая ориентированная линия		
2		Темная ориентированная линия		
3		Граница силуэта		
4				
5		Прямолинейная ориентированная граница		
6		Прямолинейная ориентированная граница		
7		Прямолинейная ориентированная граница		
8		Движение в предельном направлении		

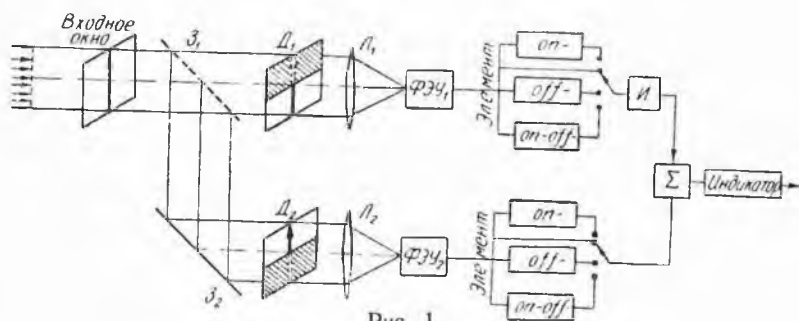


Рис. 1.

вытекает ряд требований к моделирующей системе. Прежде всего, необходимо, чтобы в модели можно было воспроизводить любые формы зон возбуждения и торможения различных рецептивных полей. Во-вторых, должна быть обеспечена возможность воспроизведения следующих временных свойств нервных элементов: чувствительность к включению стимула (для элементов on-типа), к его выключению (для элементов off-типа) и к включению — выключению стимулов (для элементов on — off-типа). Блок-схема моделирующего устройства, удовлетворяющего этим требованиям, приведена на рис. 1.

#### Описание модели

Зоны возбуждения и торможения воспроизводятся в модели合理地 путем использования дополняющих друг друга диафрагм. Исходное изображение, поступающее, например, от диапроектора через входное окно системы, на полупрозрачном зеркале  $Z_1$  разделяется на два изображения. Одно из них через диафрагму  $D_1$  после собирающей линзы  $L_1$  поступает на фотоумножитель  $\PhiЭУ_1$ . Второе изображение, отразившись от зеркала  $Z_2$ , поступает через диафрагму  $D_2$  и собирающую линзу  $L_2$  на второй фотоумножитель  $\PhiЭУ_2$ . Плоскости, в которых находятся диафрагмы  $D_1$  и  $D_2$ , — это плоскости четких изображений входного сигнала. На диафрагме  $D_1$  прозрачна (частично или полностью) только часть, повторяющая форму зоны торможения, а на  $D_2$  — повторяющая по форме зону возбуждения рецептивного поля. Линзы  $L_1$  и  $L_2$  играют роль интеграторов, которые собирают полные световые потоки, прошедшие через соответствующие диафрагмы.

С фотоумножителя  $\PhiЭУ_1$  через инвертор  $I$  и от  $\PhiЭУ_2$  непосредственно сигналы поступают на сумматор разнополярных сигналов  $\Sigma$ . С выхода его сигнал поступает на индикатор, например, на вольтметр или на вход осциллографа с потенциальным входом. Осциллограф удобен тем, что стимул в зоне входного окна модели можно перемещать на величину, прямо пропорциональную горизонтальному смещению луча осциллографа. Тогда на экране можно непосредственно наблюдать кривую зависимости амплитуды реакции от движения стимула вдоль некоторой прямой в зоне входного окна модели рецептивного поля. При использовании вольтметра в качестве выходного индикатора по его показаниям определяется величина реакции модели на указанный стимул в данном участке рецептивного поля.

Для воспроизведения временных особенностей локальных детекторов (инерции, адаптации и различной чувствительности к направлению движения) сигналы с выходов  $\PhiЭУ_1$  и  $\PhiЭУ_2$  подаются на входы сумматора через соответствующие on-, off- или on — off-элементы (рис. 1). На рис. 2, а и б приведены блок-схемы элементов on-, off- и on — off-типа. На рис. 2, в показаны соответствующие реакции каждого из элементов на включение — выключение входного сигнала. Включение фотоумножителей  $\PhiЭУ_1$  и  $\PhiЭУ_2$  к входам сумматора, например, через элементы on-типа, соот-

ветствует тому, что все элементы зоны возбуждения и торможения рецептивного поля принадлежат к оп-типу.

При моделировании детекторов движения, в частности, детекторов направленного движения, возникает необходимость воспроизводить элементы оп-типа в зонах возбуждения рецептивного поля, а в зонах торможения — элементы off-типа. Это требование удовлетворяется в системе включением ФЭУ<sub>1</sub> через элемент off-типа, а ФЭУ<sub>2</sub> — через элемент оп-типа к соответствующим входам сумматора. Элемент включения (рис. 2, а) оп-типа является инерционным, адаптирующимся и не реагирует на постоянно

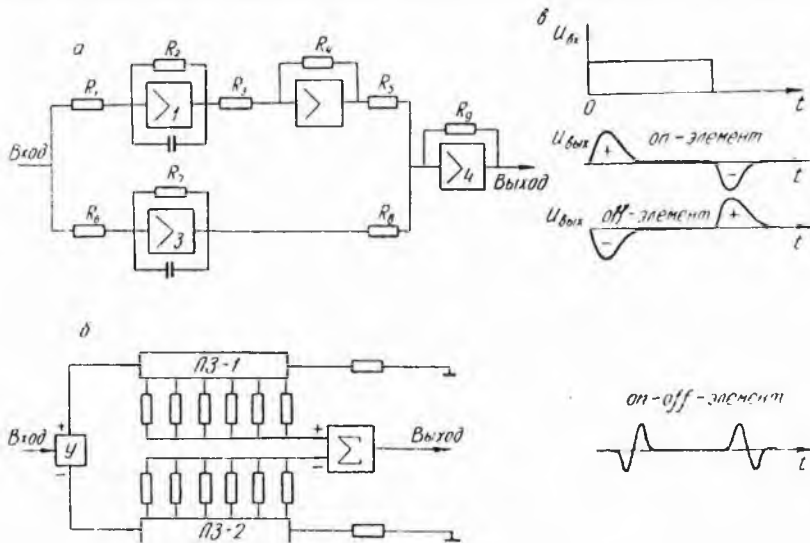


Рис. 2.

действующее возмущение. На выходе этого элемента, воспроизводящего подпороговые реакции нервных клеток, возникает положительный сигнал при включении (аналог деполяризации нервной клетки) и отрицательный — при выключении (аналог гиперполяризации клетки). Функциональная схема элемента off-типа не отличается от схемы элемента оп-типа. Нужно только коэффициенты усиления и постоянные времени у операционных усилителей 1 и 2 (рис. 2, а) поменять таким образом, чтобы у 1 оказались все параметры звена на усилителе 2, и наоборот. Модели оп-, off- и оп — off-элементов описаны в работе [4]. Одна из возможных реализаций элемента оп — off-типа показана на рис. 2, б. Рассмотрим работу элемента оп — off-типа. Входной сигнал с выходов усилителя  $У$  в виде двух разнополярных сигналов поступает на входы линий задержки  $ЛЗ1$  и  $ЛЗ2$ , воспроизводящих инерционные возбуждение и торможение нервных элементов. Способ распределения мгновенных значений входного сигнала во времени (весовая функция системы) определяется изменением сопро-

тивлений на выходах линий задержки. Сигналы возбуждения и торможения складываются на сумматоре  $\Sigma$  и поступают на выход в виде сигнала, схематически изображенного на нижнем графике рис. 2, в, если на входе элемента действует возмущение в форме прямоугольного импульса. Элемент on-off-типа можно выполнить из элемента on-типа, если инвертировать отрицательные сигналы последнего.

В таблице (а и б) показаны формы диафрагм  $D_1$  и  $D_2$ , которые нужно использовать для воспроизведения функциональных особенностей соответствующих рецептивных полей. Рецептивное поле первого типа (таблица) является локальным детектором светлой линии. Зона торможения у этого поля отсутствует. Формально такое рецептивное поле приближенно осуществляет операцию интегрирования двумерного сигнала в направлении оси рецептивного поля — анизотропное интегрирование вдоль одного направления. Детектор второго типа в таблице функционально аналогичен предыдущему. Детекторы третьего и четвертого типов приближенно вычисляют вторую производную входного сигнала со знаками плюс и минус соответственно и выделяют контуры силуэтов. Детектор пятого типа приближенно определяет первую производную в направлении, перпендикулярном к оси рецептивного поля, являясь локальным детектором ориентированной границы силуэта. Максимумы реакции такого детектора имеют противоположные знаки длядвигающихся светлой и темной границ.

Детекторы шестого и седьмого типов приближенно вычисляют вторую производную и вторую производную со знаком минус соответственно в направлении, перпендикулярном к оси поля. Максимумы реакций таких детекторов двуполярны и возникают на границе светлого и темного. Наконец, детектор последнего типа чувствителен к движению объекта в предпочтительном направлении, указанном в таблице стрелкой.

Дискретные модели локальных детекторов и способы их реализации на цифровых вычислительных машинах описаны в работе [5]. Непрерывные модели, аналогичные рассмотренным выше и позволяющие воспроизводить пространственно-временные свойства любых локальных детекторов, нам неизвестны. Рассмотренный вариант модели или специально модернизированный может быть использован в качестве базового элемента универсальной оптической вычислительной машины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ф. Розенблатт. Принципы нейродинамики. М., «Мир», 1965.
2. Б. Бернс. Неопределенность в нервной системе. М., «Мир», 1969.
3. D. H. Hubel, T. N. Wiesel. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. «J. Physiol.» **160**, 106 (1962).
4. Ю. П. Бугай. Исследование нейроподобных элементов и систем как устройств первичной переработки информации. Автореф. канд. дисс., Харьков, 1968.
5. М. М. Бонгард. Проблемы узнавания. М., «Наука», 1967.

## УСТРОЙСТВО ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ВХОДЕ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

*Ю. И. Нефедов, В. Г. Червов, А. В. Шатохин*

При решении многих научно-технических задач возникает необходимость оперативной обработки визуальной информации на цифровой вычислительной машине (ЦВМ). Чтобы существенно сократить время решения таких задач и эффективно использовать быстродействие современных ЦВМ (миллиарды операций в секунду), необходимо создать специальные устройства первичной обработки и ввода визуальной информации [1—3]. Их назначение — устранить в предъявляемых изображениях избыточность данных, которую создают детали, имеющие малую информативную ценность.

Один из путей устранения избыточности входных данных — сокращение координатных описаний за счет выделения и кодирования существенных (полезных) признаков изображений. Формальной процедуры задания исходной системы признаков пока не существует. Известны лишь некоторые критерии оценки информативности (полезности) признаков [4—7]. Широкое распространение получили вероятностные и энтропийные критерии оценки информативности признаков [7—10]. Вероятностный критерий, основанный на предположении о том, что важность признаков непосредственно связана с вероятностью их появления, используется в рассматриваемой ниже системе с целью сокращения времени анализа признаков.

Сокращение исходного описания изображений осуществляется в два этапа. Вначале выделяются признаки, достаточно полно отражающие структурные особенности входных изображений. При этом последовательность выделения признаков может быть произвольной. Для многих классов реальных изображений (фотоснимков со следами ядерных частиц, интерферограмм плазмы, аэрофотоснимков и др.) такими признаками могут быть прямые определенной ориентации, углы, изломы, пересечения, линии с определенной кривизной.

На втором этапе сокращается время первичной обработки информации за счет изменения последовательности анализа признаков в соответствии с вероятностью их появления.

Блок-схема устройства предварительной обработки изображений, которое может быть использовано для ввода изображений в ЦВМ, приведена на рис. 1. Здесь ЭЛТ — электронно-лучевая трубка с коротким послесвечением люминофора; Д — входное изображение в виде диапозитива; ФЭУ — фотоэлектронный умножитель; ПУ — пороговые устройства; ВК — блок выделения контуров; УФ — усилители-формирователи; СГ — синхрогенератор; ГИ — генератор импульсов; ЛЗ — линия задержки; СЧ — двоичные счетчики

импульсов; ПКА — преобразователи код — аналог; ДШ — дешифратор; И — блоки логического умножения; ИЛИ — блоки логического сложения; К — коммутатор выходов дешифратора; П — преобразователи напряжений; ВЧ — генератор высокочастотных синусоидальных напряжений; М — блоки амплитудной модуляции высокочастотных напряжений; ИНТ — интегрирующие устройства; С — устройство сигнализации; ИУ — измерительные устройства. Штрих-

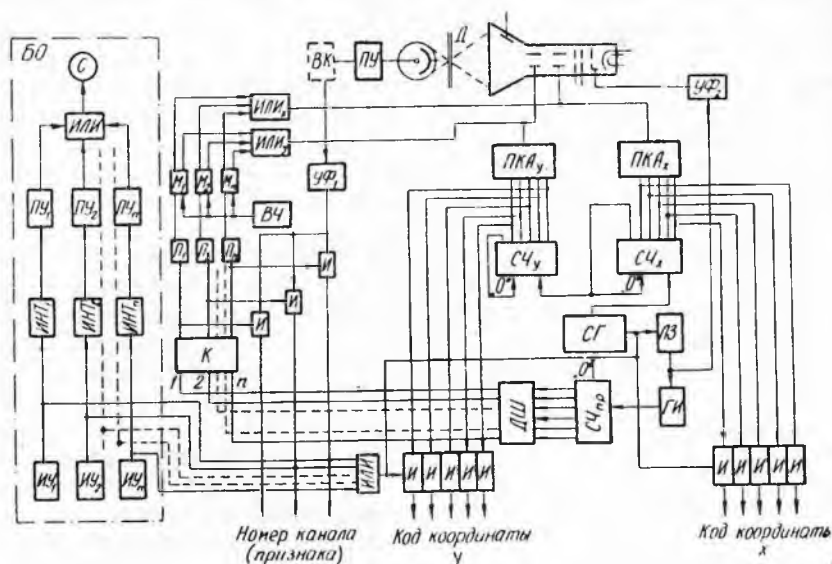


Рис. 1.

пунктирной линией обведен БО — блок обучения, который используется для определения вероятности появления априорно выбранных признаков в анализируемом классе изображений.

Система позволяет выделять из изображений, предъявляемых на входе, ориентированные прямые, углы со специфической ориентацией сторон, точки пересечения ориентированных прямых, линии с определенной кривизной, а также определять координаты этих элементов.

Выделение признаков осуществляется на телевизионной системе типа «бегущий луч». В отличие от обычных систем с «бегущим лучом», в данной системе сканирующий луч ЭЛТ «расфокусируется» в виде прямой линии, угла или окружности. Такие «расфокусировки» создаются путем дополнительного высокочастотного отклонения луча по определенному закону. Конфигурация высокочастотной развертки обуславливает выделение того или иного признака. В блоке ВК выделяются контуры световых границ определенной формы. Фотоснимки (рис. 2) иллюстрируют работу системы (в которую входят ЭЛТ, ФЭУ, ПУ, ВК и УФ<sub>1</sub>) в режиме выделения

контуров прямолинейных световых границ, определенной ориентации. На рис. 2, *а*, показано входное изображение, а на рис. 2, *б*, *в*, *г* — выходные изображения, формируемые на экране видеоконтрольного устройства, подключенного к выходу  $УФ_1$ . Система выделения признаков подробно описана в работах [11, 12].

Работу устройства предварительной обработки изображений

(рис. 1) можно пояснить с помощью временных диаграмм (рис. 3, *а* — до окончания обучения, *б* — после него), где указаны выходные напряжения всех основных блоков. Блоки  $СГ$ ,  $СЧ_x$ ,  $СЧ_y$ ,  $ПКА_x$ ,  $ПКА_y$ , используются для создания отклоняющих напряжений, обеспечивающих шаговое перемещение луча ЭЛТ. Ступенчатые напряжения шаговой развертки формируются в блоках  $ПКА_x$ ,  $ПКА_y$ . За время модуляции яркости луча ЭЛТ в одной точке изображения последовательно анализируются все априорно выбранные признаки. Как только обнаруживается какой-либо признак, осуществляется переход к анализу признаков в следующей точке изображения. Признаки кодируются двоичными кодами, формируемыми в счетчике признаков ( $СЧ_{пр}$ ). Коды признаков дешифрируются в ДШ. На выходе ДШ каждому признаку соответствует отдельный канал. Выходные сигналы ДШ подаются через коммутатор каналов ( $К$ ) на соответствующие входы преобразователей напряжений ( $П_1 — П_n$ ). В ответ на входной сигнал каждый преобразователь напряжений формирует два прямоугольных импульса разной (или одинаковой) амплитуды. Эти импульсы используются для модуляции высокочастотных синусоидальных напряжений, поступающих в  $М$  с  $ВЧ$ .

Промодулированные высокочастотные напряжения с блоков  $М$  и  $ИЛИ$  подаются на отклоняющие пластины ЭЛТ, «расфокусируя» луч по определенному закону.

На выходе системы, как и на входе ДШ, каждому признаку соответствует отдельный канал. Однако выходные сигналы —

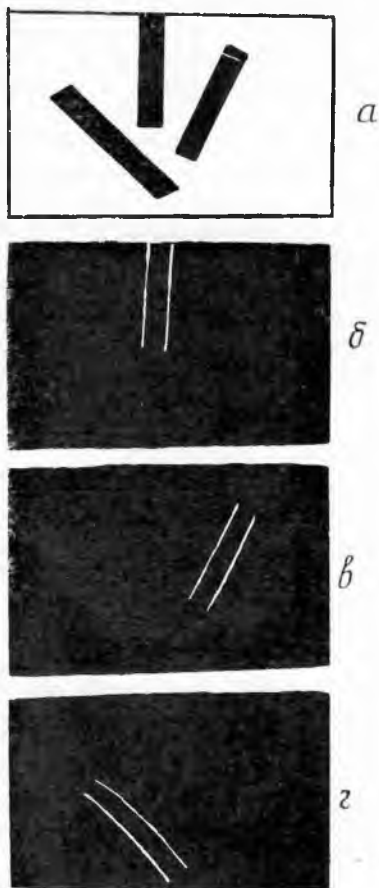


Рис. 2.

коды признаков и их координат — появляются лишь при наличии анализируемых признаков в изображении. Для этого в системе используются блоки И и ИЛИ.

Рассмотрим работу блока обучения (БО). Сигналы, соответствующие выделенным из изображения признакам, подаются по отдельным каналам на интегрирующие устройства (ИНТ), в качестве которых могут использоваться RC-элементы или счетчики

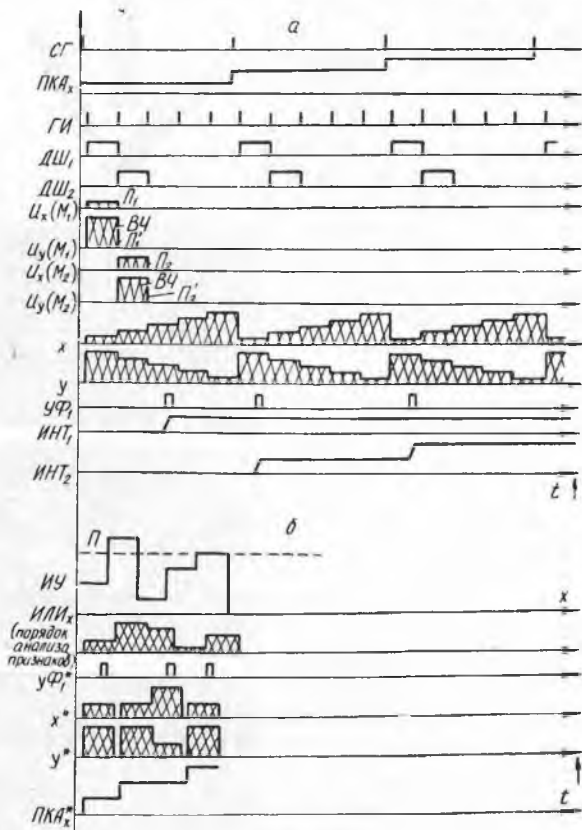


Рис. 3.

импульсов. В ходе обучения системе предъявляются различные изображения, подлежащие обработке (обучающая последовательность). При этом в ИНТ накапливаются данные о частоте появления каждого признака. Измерительные устройства (ИУ<sub>1</sub> — ИУ<sub>n</sub>) позволяют определять величину выходных сигналов ИНТ. Блоки ПУ<sub>1</sub> — ПУ<sub>n</sub>, ИЛИ и С предназначены для сигнализации об окончании процесса обучения. Величина порога, устанавливаемого в ПУ, соответствует определенному числу повторений признаков. Чем выше величина порога, тем дольше процесс обучения

и тем точнее определяется частота (вероятность) появления признаков. Как только в каком-либо из интеграторов сформируется сигнал, превышающий значение этого порога, сработает блок сигнализации (С). Теперь по величине сигналов на выходах ИУ можно судить о частоте появления каждого признака. Зная эти данные, с помощью коммутатора каналов (К) подключаем канал 1 дешифратора к тому преобразователю (П), который формирует напряжения модуляции высокочастотных сигналов, соответствующие признаку, частота появления которого наибольшая. Далее следует перекоммутировать все выходы ДШ таким образом, чтобы последовательность анализа признаков соответствовала уменьшению частоты их появления. Такая последовательность анализа признаков позволит увеличить быстродействие устройства предварительной обработки изображений за счет уменьшения среднего времени анализа признаков в каждой точке изображения.

В заключение следует отметить, что быстродействие устройства предварительной обработки визуальной информации можно еще более увеличить, если предусмотреть в нем возможность непрерывного (динамического) обучения (с целью более достоверного определения вероятностей появления признаков) и автоматическую коммутацию каналов дешифратора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. И. Цуккерман. О вводе информации в мозг и в вычислительную машину. Сб. «Информация и кибернетика». М., 1967.
2. G. E. Forsen. A. preprocessor for an automation's eye. Conf. Rec. Winter Convent. «IEEE Trans. on Aerospace and Electron Systems», III E/12—III E/34 (1967.)
3. Л. П. Ярославский. Устройства ввода — вывода изображений для цифровых вычислительных машин. «Библиотека по автоматике», вып. 303, 1968.
4. А. Г. Ивахненко. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. Киев, «Техніка», 1969.
5. И. Г. Турбович, В. Г. Гитис, В. К. Маслов. Опознавание образов. М., «Наука», 1971.
6. Н. Г. Загоруйко. Методы распознавания и их применения. М., «Сов. радио», 1972.
7. В. А. Ковалевский, М. Г. Шлезингер и др. Читающие автоматы. Киев, «Наукова думка», 1965.
8. Р. Уилсон. Оптические читающие устройства. М., «Мир», 1969.
9. Х. Марко, Х. Габел. Система распознавания рукописных знаков, состоящая из гомогенных слоев. ЭИ «Приборы и элементы автоматки», № 1, 1971.
10. М. М. Бонгард. Проблема узнавания. М., «Наука», 1967.
11. Ю. И. Нефедов. Исследование принципов переработки информации в зрительной системе и их использование при построении телевизионных пространственно-временных фильтров изображений. Автореф. канд. дисс., Харьков, 1971.
12. Ю. И. Нефедов, В. Г. Червов, Ю. П. Бугай. Исследование возможности анизотропного выделения контуров изображений в телевизионной передающей системе. Сб. «Радиотехника», вып. 11. Изд-во Харьковск. ун-та, 1969.

## О ПРЕЦИЗИОННОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ РАЗВЕРТКИ

Ю. И. Нефедов, Р. Т. Петрушко, А. В. Шатохин

В последние годы в устройствах ввода — вывода визуальной информации для ЦВМ большое внимание уделяется проблеме создания прецизионных телевизионных растров. Одной из возможностей разработки таких растров является программная развертка носителя информации электронным лучом ЭЛТ от ЦВМ [1]. Изображения считываются (например, с фотопленки) с помощью системы «бегущий луч».

Прецизионные телевизионные системы с электронной разверткой от ЦВМ все шире используются в нейрофизиологии при исследовании рецептивных полей клеток сетчатки и зрительной коры для стимуляции фоторецепторов и построения карт рецептивных полей [2,3].

Прецизионность растра сильно зависит от стабильности и линейности оконечного каскада блока развертки. Наибольшее распространение в прецизионных системах с точечным и непрерывным растрами получили блоки развертки, в которых код ЦВМ преобразуется с помощью прецизионных цифро-аналоговых преобразователей (ПКН) в непрерывную величину с последующим усилением в оконечных каскадах блоков развертки [4]. Последние, используемые в устройствах ввода — вывода информации для ЦВМ, должны обладать свойствами, присущими как усилителям постоянного тока, так и широкополосным.

В выходных каскадах на транзисторах применяются отклоняющие системы (ОС) с сердечником и без него. Первые обладают большей чувствительностью при заданных значениях индуктивности, однако если разрешающая способность устройства ввода — вывода информации высока, сказывается влияние гистерезиса материала сердечника. Применение ОС без сердечника требует увеличения мощности выходных каскадов, что, в свою очередь, понижает стабильность, увеличивает габариты устройства, ухудшает тепловые режимы электронных схем. При этом мощные транзисторы (КТ 802, КТ 805, КТ 903, КТ 908 и др.), используемые в выходных каскадах, обладают сравнительно небольшой величиной допустимого напряжения на коллекторе [5]:

$$U_{km} > \frac{I_m L}{t_1} + I_m R_L,$$

где  $U_{km}$  — допустимое напряжение на коллекторе;

$I_m$  — максимальный ток ОС;

$t_1$  — минимальная длительность прямого хода при максимальном токе ОС;

$R_L$  — активное сопротивление ОС;

$L$  — индуктивность ОС.

Наиболее эффективным методом снижения напряжения на ОС является уменьшение  $L$  [5,6]. Для сохранения заданной величины ампервитков ОС необходимо увеличивать величину тока. Решение этой задачи связано с рядом трудностей [7]:

1) устранением влияния дрейфа выходного тока на параметры оконечных усилителей;

2) обеспечением высокой линейности амплитудной характеристики при работе с большими отклоняющими токами, если соблюдаются гомотетические преобразования входного сигнала;

3) устранением зависимости тока в отклоняющих катушках при изменении их активного сопротивления от температуры;

4) исключением влияния помех, наводок и др.

Литературные данные [5—10] и результаты эксплуатации разработанного усилителя показывают, что при высоких требованиях к стабильности, помехоустойчивости необходимо пользоваться «мостовыми» схемами усилителей развертки и отклоняющих катушек.

На рис. 1 изображена схема включения отклоняющих катушек и усилителя развертки. Из схемы видно, что все синфазные наводки, помехи, изменения сопротивлений катушек от температуры и нестабильности напряжения питания понижаются за счет встречного включения катушек и применения мостового усилителя. Полезный сигнал вызывает разбалансировку мостового усилителя. При этом ток в одном плече увеличивается, а в другом уменьшается на такую же величину. Возрастающее магнитное поле катушки вызывает линейное перемещение светового пятна на экране ЭЛТ.

Для построения по блок-схеме (рис. 1) оконечных усилителей, отвечающих вышеуказанным требованиям (высокая стабильность, линейность и др.), используется ряд электронных схем. Одним из эффективных и сравнительно простых методов борьбы с дрейфом нуля в УПТ является применение балансных дифференциальных усилителей, введение глубоких обратных связей, термокомпенсация нелинейными элементами [11, 12]. Дифференциальный усилитель, обладая высокой стабильностью [13], позволяет осуществить ряд операций: а) переходить от схем с симметричными входом и выходом к схемам с несимметричными входом и выходом, и наоборот; б) просто вводить обратную связь.

Высокая линейность амплитудной характеристики отклоняющего тока в усилителе достигается введением глубокой отрицательной обратной связи. С этой целью выходные каскады

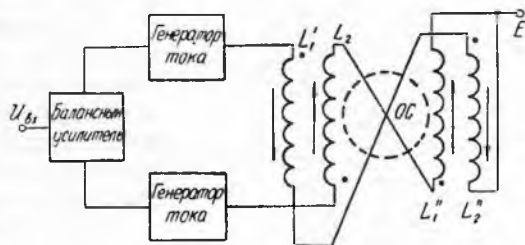


Рис. 1.

усилителя строятся по схеме генератора тока с усиленной обратной связью [7, 14].

Выходное сопротивление такого усилителя во много раз превышает сопротивление ОС, что позволяет сохранить форму входного напряжения на ОС и на экране ЭЛТ. Выходной транзистор (или параллельное включение транзисторов) включается по схеме с общими эмиттером и коллектором. Схема с общей базой, обладая высокой линейностью и максимальной граничной частотой, теряет свои преимущества за счет малого входного сопротивления [5, 7].

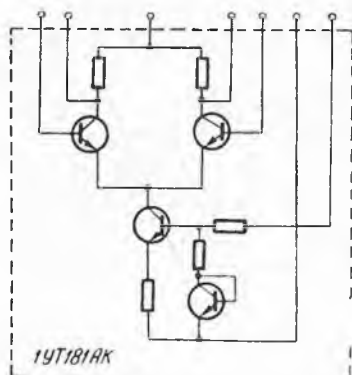


Рис. 2.

Отклоняющая система (ОС) в выходном каскаде может быть включена в цепь коллектора и эмиттера. Для соблюдения гомотетических преобразований входного сигнала более предпочтительно включение ОС в цепь коллектора [15].

При проектировании усилителя необходимо учесть возможность самовозбуждения усилителя, которая устраняется фазокомпенсирующими цепями [11, 12]. В процессе разработки входной цепи такого усилителя

необходимо обратить внимание на симметрию балансного усилителя при несимметричном входе. Чтобы усилитель реагировал только на разность входных напряжений, требуется выполнить неравенство [11]

$$K_{\text{ср}} \ll K_p,$$

где  $K_p = \frac{K_1 + |K_2|}{2}$  — коэффициент усиления разности входных напряжений;

$K_1$  — коэффициент усиления по первому входу;

$K_2$  — коэффициент усиления по второму входу;

$K_{\text{ср}} = K_1 - |K_2|$  — коэффициент усиления среднего уровня выходных напряжений.

Для выполнения условия (2) необходимо увеличивать сопротивление в цепи эмиттера. С этой целью эффективнее всего включать в цепь эмиттера «генератор тока». Для описываемых усилителей во входных каскадах удобно применять унифицированные интегральные схемы типа 1УТ181 (рис. 2). Такие усилители обычно проектируются следующим образом [5, 16].

1. На основании требований развертки луча ЭЛТ избирается тип схемы усилителя.

2. Выбирается тип отклоняющей системы (ОС) и рассчитывается количество ампервитков, необходимых для создания развертки.

3. Устанавливается тип транзистора (при необходимости — параллельно включенных транзисторов) выходного каскада и напряжение питания.

4. Рассчитывается отклоняющая система.

5. Определяется тепловой режим транзисторов выходного каскада.

6. Вычисляются параметры схем, согласующих выход ПКН (или другого источника информации) и вход мощных каскадов.

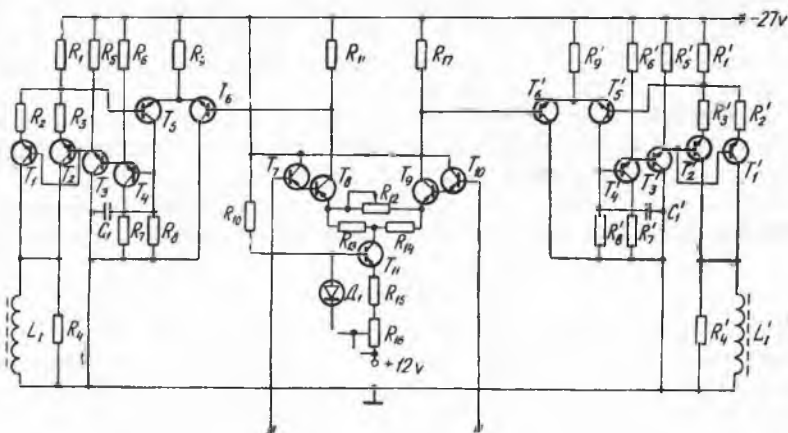


Рис. 3.

Положения 3—5 являются общими при проектировании усилителей [5, 11—12, 14] и расчете балансных и дифференциальных схем [11—13]. В качестве примера был разработан и проверен в эксплуатации усилитель для программной развертки луча ЭЛТ в устройствах ввода—вывода информации (рис. 3). В усилителе (рис. 3) выходные кремниевые транзисторы КТ805В по коэффициенту усиления  $B$  подбирались парой, отличающейся на  $\pm 10\%$ , с минимальным значением  $I_{k0}$ , максимальной  $f_a$  (также парой). Подбираемые транзисторы отвечали условию (1).

Для повышения линейности выходного тока необходимо выбрать линейный участок работы на выходных характеристиках транзистора КТ805Б.

Это достигается параллельным включением транзисторов КТ805Б с сопротивлением обратной связи 0,5—1 ом (для выравнивания параметров), введением усиленной обратной связи по току с помощью сопротивлений ( $R_3 R_{2-2} R_{3-3}$ ) и дифференциальных усилителей ( $T_5, T_6, T_5', T_6'$  типа КТ312).

Для повышения симметрии усилителя во входном балансном усилителе ( $T_8, T_9$  типа ГТ321) в цепь эмиттеров включен генератор тока на транзисторе ( $T_{11}$ ). Эту схему можно заменить интегральным модулем 1УТ181АК.

Для исключения паразитных колебаний ОС шунтируется сопротивлением ( $R_4, R_4'$ ), определяемым по формуле [5]:

$$R_{ш} \approx 0,5 \sqrt{\frac{L}{C_k + C_n}}$$

где  $C_k$  — емкость коллекторного перехода мощного транзистора;  
 $C_n$  — межвитковая емкость ОС.

Усиление в усилителе регулируется сопротивлением ( $R_{12}$ ).

Усилитель (рис. 3) испытывался в прецизионных устройствах ввода информации с точечным растром  $2048 \times 2048$  точек ( $f_r = 100$  кГц) и в устройствах вывода информации на ЭЛТ в виде чертежей и графиков ( $f_r = 20$  кГц).

При работе на отклоняющую систему с  $L = 560$  мкГн отклонение луча от центра ЭЛТ достигало 5 см при высокой линейности отклоняющего тока с  $\tau_{ук} = 2$  мксек при  $I_{вых} = 1$  а.

Недостатком таких усилителей является низкий коэффициент полезного действия, так как они работают в режиме класса А.

## ВЫВОДЫ

1. Для улучшения стабильности и помехоустойчивости электромагнитной прецизионной развертки необходимо применять мостовые схемы включения ОС и выходных каскадов усилителя.

2. С целью повышения линейности отклоняющего тока выходные каскады должны выполняться по схеме стабилизатора тока.

3. Параллельно включенные транзисторы оконечного каскада повышают линейность выходного тока и облегчают тепловой режим усилителя.

4. Повышение быстродействия электромагнитной развертки достигается уменьшением индуктивности ОС с одновременным увеличением выходного тока (для сохранения необходимого количества ампервитков).

## ЛИТЕРАТУРА

1. М. А. Кузьмичев, А. М. Пряницкий, А. А. Чистюхин, А. В. Шатохин. Обзор и анализ электронно-оптических систем считывания информации с фотопленки. Сб. «Приборы и системы автоматки», вып. 14. Изд-во Харьковск. ун-та, 1970.

2. D. N. Spinnelli. Receptive field organization of ganglion cells in the cat's retina. «Exptl. Neurol.», 1967, 19.

3. D. N. Spinnelli, T. W. Barret. Visual receptive field organization of single units in the cat's visual Cortex. «Exptl. Neurol.», 1968, 24.

4. М. А. Кузьмичев, А. А. Чистюхин, А. В. Шатохин. Цифро-аналоговый преобразователь сканирующей системы на электронно-лучевой трубке. Сб. «Приборы и системы автоматки», вып. 20. Изд-во Харьковск. ун-та, 1970.

5. А. М. Тищенко, Б. М. Лебедев и др. Расчет и проектирование импульсных устройств на транзисторах. М., «Сов. радио», 1964.

6. Б. Э. Бонштедт, М. Г. Маркович. Фокусировка и отклонение пучков в электронно-лучевых приборах. М., «Сов. радио», 1967.

7. А. З. Модель, В. В. Дрангинис. Вопросы построения оконечных каскадов медленных разверток. «Вопросы радиоэлектроники», сер. IX, № 4, 1961.

8. Н. П. Кириченко, М. А. Кузьмичев, А. М. Пряницкий, А. А. Чистюхин, А. В. Шатохин. Особенности построения выходных каскадов быстродействующей программно управляемой развертки. Сб. «Приборы и системы автоматки», вып. 17. Изд-во Харьковск. ун-та, 1970.

9. Н. Н. Васильев, В. Ф. Смирнова. Расчет транзисторного выходного каскада кадровой развертки с трансформаторным выходом. «Вопросы радиоэлектроники», сер. IX, вып. 4, 1968.

10. Г. А. Козина, Б. А. Седов. Устройство оконечных усилителей. «Вопросы радиоэлектроники», сер. IX, вып. 3, 1968.

11. Ю. В. Виноградов. Основы электронной и полупроводниковой техники. М., «Энергия», 1968.

12. И. П. Степаненко. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М., «Энергия», 1967.

13. Б. Ф. Грачев, В. С. Наконечный. Температурный дрейф дифференциальных усилителей. «Вопросы радиоэлектроники», сер. IX, вып. 1, 1966.

14. Источники питания на полупроводниковых приборах. Под ред. С. Д. Додика и Е. И. Гальперина. М., «Сов. радио», 1969.

15. С. Д. Додик. Полупроводниковые стабилизаторы тока и напряжения. М., «Сов. радио», 1967.

16. А. З. Модель, В. В. Дрангинис. Высокостабильные оконечные каскады генераторов низкочастотной развертки на транзисторах. «Радиотехника», 16, 7(1961).

## ОДИН ИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ ОБУЧАЕМОСТИ

*Н. П. Дидиченко*

Цель настоящей работы — определить параметры линейной модели поведения, предложенной Р. Бушем и Ф. Мостеллером, при обучении животного какой-либо реакции в  $T$ -образном лабиринте. В опытах использовался  $T$ -образный лабиринт с ящиками на двух концах буквы  $T$ . При каждом испытании голодное животное помещалось в исходную позицию (находящуюся в хвосте  $T$ ), затем его заставляли бежать вдоль лабиринта до поворота направо или налево. В ящике на правой стороне лабиринта находилась пища, в левом же ее никогда не было. Таким образом, в ходе некоторых испытаний животное могло не получать пищи. Много раз подвергаясь подобному испытанию, оно в результате обучалось поворачивать направо. Можно было бы рассмотреть многие аспекты поведения животного, но мы обратимся только к одному: куда — направо или налево — поворачивает зверек при каждом испытании. Для отдельного индивидуума данными, которые будут рассматриваться, является ряд правых и левых поворотов.

Следуя Р. Бушу и Ф. Мостеллеру [1], такое обучение опишем линейной моделью

$$p_{n+1} = \begin{cases} Q_1 p_n = \alpha_1 p_n + (1 - \alpha_1) & \text{— при повороте направо,} \\ Q_2 p_n = \alpha_2 p_n + (1 - \alpha_2) & \text{— при повороте налево,} \end{cases} \quad (1)$$

где  $p_n$  — вероятность поворота направо при  $n$ -м испытании, причем  $p_1 = \frac{1}{2}$ .

Так как

$$p_n + q_n = 1, \quad (2)$$

то (1) можно переписать в виде

$$q_{n+1} = \begin{cases} \tilde{Q}_1 q_n = \alpha_1 q_n & \text{— при повороте направо,} \\ \tilde{Q}_2 q_n = \alpha_2 q_n & \text{— при повороте налево.} \end{cases} \quad (3)$$

Необходимо выбрать наилучшие, с точки зрения соответствия данных, значения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , или (на языке математической статистики) на основании данных опыта оценить параметры  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Математический анализ такой модели осложняется тем, что последовательность операторов от пробы к пробе применительно к  $q$  контролирует организм. Зависимость применения операторов

$\tilde{Q}_1$  или  $\tilde{Q}_2$  к  $q_n$  определяется тем, получило ли животное подкрепление или нет. В результате этой особенности контроля организма значения  $q$  распределяются в каждой пробе. Подобное распределение в пробе  $n$  может быть воспроизведено путем выписывания дерева событий (получение и неполучение пищи), которые могли бы иметь место в первых  $(n-1)$ -пробах. В этом случае каждая ветвь данного дерева соответствует частной последовательности получения пищи и отсутствия ее. Предполагаем, что ветвь  $\gamma$  дерева заканчивается в конце пробы  $(n-1)$ , где значение  $q$  примет вид  $q_{\gamma n}$ . Вероятность этой частной ветви, полученная перемножением отдельных точек ветвления, обозначим  $p_{\gamma n}$ . Таким образом, имеем случайную величину  $q_n$  с распределением вероятностей, которое определяется равенством

$$P\{q_n = p_{\gamma n}\} = p_{\gamma n}.$$

Момент  $r$ -го порядка распределения  $q_n$  в дальнейшем станем обозначать  $V_{rn}$ .

Пусть  $S_n$  представляет «неполучение пищи в пробе  $n$ ».

Рассмотрим среднюю вероятность неполучения пищи в  $r$  пробах, начиная с  $n$ -й пробы:

$$\begin{aligned} & P\{S_n \cap S_{n+1} \cap \dots \cap S_{n+r-1}\} = \\ & = \sum_{\gamma} P\{S_n \cap S_{n+1} \cap \dots \cap S_{n+r-1} / q_{\gamma n} p_{\gamma n}\} = \\ & = \sum_{\gamma} q_{\gamma n} (\alpha_2 q_{\gamma n}) \dots (\alpha_2^{r-1} q_{\gamma n}) p_{\gamma n} = \alpha_2^{\frac{r(r-1)}{2}} V_{rn}. \end{aligned}$$

Согласно [2],

$$V_{r,n+1} = \alpha_1^r V_{rn} + (\alpha_2^r - \alpha_1^r) V_{r+1,n}. \quad (5)$$

Пусть

$$\sum_{n=1}^{\infty} V_{rn} = V_r. \quad (6)$$

Введем обозначение

$$C_r \equiv \alpha_2 \frac{r(r-1)}{2}. \quad (7)$$

На основании (5)–(7) имеем

$$q_1 \alpha_2 \frac{r(r+1)}{2} + (C_{r+1} - C_r) \alpha_2^r + C_r \alpha_1^r \alpha_2^r - C_{r+1} \alpha_1^r = 0. \quad (8)$$

Полагая  $r = 1; 2$ , относительно  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  получаем систему

$$\begin{aligned} (q_1 + C_2 - C_1) \alpha_2 + C_1 \alpha_1 \alpha_2 - C_2 \alpha_1 &= 0; \\ q_1^2 \alpha_2^3 + (C_3 - C_2) \alpha_2^2 + C_2 \alpha_1^2 \alpha_2^2 - C_3 \alpha_1^2 &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Решив (9), найдем оценки параметров  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Оценки неизвестных параметров, полученные вышеизложенным методом, лучше тех, которые определены методом наибольшего правдоподобия. Преимущества данного метода по сравнению с другими заключаются в простоте системы (9), а также в возможности нахождения параметров для каждого индивидуума в отдельности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р. Буш и Ф. Мостеллер. Стохастические модели обучаемости. М., Физматгиз, 1962.
2. Р. Аткинсон, Г. Бауэр, Э. Кротерс. Введение в математическую теорию обучения. М., «Мир», 1969.

### ОПТИМИЗАЦИЯ СПОСОБА ОБРАБОТКИ ЭВРИСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

*О. К. Илюнин, В. В. Свиридов, И. П. Плисс*

Проблему выбора оптимального метода обработки статистических данных можно решать как задачу минимизации общих потерь, определяемых выражением

$$\Pi_j = \Pi(e_j) + \Pi_j(r) + \Pi(t), \quad (1)$$

где  $\Pi_j$  — общие потери при реализации  $j$ -го метода обработки для заданной ситуации;

$\Pi(e_j)$  — убытки, связанные с потерей точности;

$\Pi_j(r)$  — затраты на реализацию данного метода;

$\Pi(t)$  — потери, связанные с потерей времени на решение задачи получения конечных результатов эвристических измерений.

Величина  $e_j$  может быть вычислена по формуле

$$e_j = \sum_{i=1}^N e_{ij} P_i, \quad (2)$$

где  $P_i$  — вероятность наличия  $i$ -го закона распределения ошибок;  
 $e_{ij}$  — эффективность использования  $j$ -го метода обработки при  $i$ -м законе распределения;  
 $e_j$  — эффективность  $j$ -го метода обработки в заданной игровой ситуации

$$\sum_{i=1}^N P_i = 1. \quad (3)$$

Эффективность принятого метода обработки может определяться из выражения [1]

$$e_{ij} = \frac{D_{\min}}{D}, \quad (4)$$

где  $D_{\min}$  и  $D$  — дисперсии при оптимальном и неоптимальном методах обработки соответственно.

Для симметричных распределений выражение (4) принимает вид

$$e_{ij} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\partial \ln \varphi(x, a)}{\partial a} \right]^2 f(x, a) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{\partial \ln f(x, a)}{\partial a} \right]^2 f(x, a) dx}, \quad (5)$$

где  $\varphi(x, a)$  — закон распределения результатов измерения, принятый априорно и соответствующий принятому методу обработки;

$f(x, a)$  — фактический закон распределения;

$a$  — «истинное» значение определяемого параметра.

Формула (5) вытекает непосредственно из доказательства асимптотической эффективности оценок максимального правдоподобия [1, 2].

Затраты на реализацию конкретного метода  $\Pi_j(r)$  могут быть определены как произведение количества элементарных процедур на среднюю стоимость реализации одной из них.

Целесообразность учета стоимости реализации методов обработки обусловлена тем, что количество элементарных вычислительных и логических операций для разных способов обработки неодинаково. Например, определение оценки через полусумму крайних значений требует около  $2n$  операций [3], методом наименьших модулей — приблизительно  $C_2^{n/2}$  операций [1], где  $n$  — число измерений, а при использовании метода наименьших квадратов количество операций еще возрастет.

Вид функции  $\Pi(t)$  задается априорно или находится каким-либо способом прогнозирования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Мудров, В. Л. Кушко. Метод наименьших модулей. М., «Знание», 1971.
2. Г. Крамер. Математические методы статистики. М., ИЛ, 1948.
3. Э. Гумбель. Статистика экстремальных значений. М., «Мир», 1965.

### О НЕКОТОРЫХ СПОСОБАХ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ \*

*А. В. Карев, Л. С. Ильинская, А. П. Ильинский*

Гипноз — состояние, близкое к нормальному физиологическому сну, преимущественно к быстроволновому его типу. Это состояние отличается внешним программным управлением (в гипнологических терминах это раппорт — связь гипнотизера с гипнотиком). В этом случае программирующая информация воспринимается от гипнотизера — его речь, мимика, жесты, прикосновения и другие действия.

Самогипноз — то же состояние при наличии внутреннего программного управления (в гипнологических терминах — зона раппорта замкнута на какой-либо доминантный очаг).

Авторами данной статьи разработана методика использования гипноза и самогипноза для программирования интеллектуальной деятельности, в том числе творческого вдохновения и инсайта [1, 2]. При этом творческое вдохновение и инсайт рассматриваются как состояние быстроволнового сна с открытыми глазами, спонтанно возникающее в результате неосознанного самогипноза [1—3].

Иные методики самовнушения не позволяют добиваться самогипноза такой же глубины, как гипноз [4]. Самоотчеты испытуемых показывают, что им мешает необходимость помнить о цели и этапах проводимого эксперимента. Они боятся вместе с погашением сознания потерять программу, поскольку она хранится в собственной памяти. Испытуемый напряжен и старается удержаться, балансируя на грани потери сознания.

Классические методики гипноза снимают эту напряженность — появляется возможность проникать в глубокие слои бессознательного, где, как считает Ж. Адамар [5], скрыты основные процессы творчества. Однако цена этому преимуществу — колоссальная трудоемкость работы гипнолога.

Предлагаемая нами методика позволяет совместить преимущество самогипноза, заключающееся в отсутствии постоянной зависимости от гипнолога, с глубиной гипноза. Суть ее заключается в следующем.

Программник, в котором хранится информация, управляющая гипнотиком, находится вне последнего. Однако в отличие от

\* Доклад, прочитанный на Первой республиканской школе по нейробиологии. Канев, 1—10 июля 1971 г.

классического гипноза эта программа разворачивается не гипнологом, а каким-либо техническим устройством, например, магнитофоном, диапроектором или даже читается самим гипнотиком с листа бумаги. Такое применение технических средств для программирования гипноза принципиально отличается от сомнопедии [6] и от аутогенной тренировки [7]. Действительно, в процессе сомнопедии магнитофон воспроизводит лишь изучаемый материал, а при аутогенной тренировке проигрыватель, воспроизводя стандартные формулировки с музыкальным сопровождением, выполняет роль «ведущего», за которым повторяют текст.

В ходе работы по нашей методике программа составляется самим испытуемым до сеанса гипноза и может корректироваться им по результатам всякого последующего сеанса. Таким образом, каждый из испытуемых попеременно оказывается то гипнотизером, то гипнотиком, а его состояние отличается от самогипноза отсутствием напряжения, необходимого для сохранения контроля за выполнением задуманной программы. Более того, при достаточно глубокой — сомнамбулической — стадии гипноза (когда открыты глаза) или при использовании в роли программиста технических средств, позволяющих повторять избранные части записи, программа может быть не только линейной, но и разветвленной, с условными переходами и построением циклов, как для обычной вычислительной машины. Она может предусматривать также обычную деятельность человека, например, работу с литературой, с приборами, записи и т. д. Но подобная деятельность при этом отличается чрезвычайно высокой степенью увлеченности и сосредоточенности. Такое состояние можно считать запрограммированным творческим вдохновением.

При работе по нашей методике функции гипнолога ограничиваются следующим.

1. После отбора у достаточно гипнабельных участников в состоянии гипноза вырабатывается условный рефлекс на какое-то кодовое слово (слово-пароль), по которому сам испытуемый сможет погружать себя в состояние гипноза. Вырабатывается установка каждого испытуемого на магнитофонную запись его голоса либо на его собственный почерк, т. е., в гипнологических терминах, раппорт передается самому испытуемому.

2. На следующих этапах гипнолог осуществляет общее методическое руководство и врачебный контроль за состоянием здоровья испытуемых.

Описанная методика предоставляет новые возможности математикам и бионикам, занимающимся эвристическим программированием или проблемой «искусственного разума». Экспериментально-психологическое изучение мыслительной деятельности человека уже показало, что самоотчет о ходе решения задачи, который может изложить обследуемый, представляет собой лишь «надводную, видимую часть айсберга». Основная же часть эвристики не вербализуема, так как не подотчетна сознанию. Чтобы немного

узнать о «подводной части айсберга», в настоящее время стало традиционным использовать методологический прием экспериментального изучения осязательной активности у слепых или глазо-двигательной активности у испытуемых с нормальным зрением [8].

Очевидно, это сужает изучаемый круг задач, ибо интерпретировать глазо-двигательную или осязательную активность удается лишь во время некоторых интеллектуальных игр (шахматы, шашки, игра «пятнашки»), геометрических доказательств, при работе оператора у мнемосхемы — т. е. всегда необходим наглядно-действенный характер мышления с достаточно отчетливо выраженной и развернутой фазой исследовательской деятельности, предваряющей практические действия. К тому же изучение глазо-двигательной или осязательной активности дает самую ничтожную информацию: о порядке и времени «пронгрывания» тех или иных ходов и ничего более.

Между тем исторически известен прецедент извлечения и вербализации эвристик из бессознательного. Речь идет о ночи в Кане, когда Пуанкаре открыл тета-автоморфные ряды [5]. Бессознательно человек может размышлять одновременно о многом. Одним из характерных отличий сознания является его единость. Однако у Пуанкаре из-за бессонницы наступило такое состояние, когда он смог наблюдать за множеством параллельных потоков собственных мыслей. Иными словами, ему удалось заглянуть в последовательные слои своего бессознательного. Этот случай пока остается в литературе экзотическим и единственным, однако наша методика позволяет превратить вербализацию слоев бессознательного в повседневную деятельность. Для этого задача любого типа решается в обычном состоянии. После составления самоотчета о том, что удалось вспомнить о ходе решения, испытуемый многократно проигрывает и вербализует ход решения во все более глубоких состояниях гипноза. При этом, как в случае Пуанкаре, наиболее плодотворным оказывается совмещение в одном лице исследователя и испытуемого.

Широкое применение гипнотических методик для извлечения эвристик приведет к более стремительному накоплению данных об иных, чем у машины, принципах организации поиска решений и о других наборах «элементарных информационных процессов» у человека. А это в конце концов должно привести не только к созданию более человекоподобных машинных эвристик, но и к открытию нейробионических принципов построения структур «машинного интеллекта».

Обратимся, наконец, к вопросу, поставленному профессором М. Г. Газе-Раппопортом: «Повышает или проявляет гипноз способность?»

Самая важная черта гипнотического воздействия — это не усиление памяти и внимания, а эмоции. Занятие чем бы то ни было в состоянии гипноза доставляет наслаждение. Если это обращение к какой-либо области знания или художественного

творчества, то человек впоследствии начинает искать способы еще и еще раз испытать такое удовольствие. Хозе Дельгадо убедительно показал, что гедонический критерий в выборе деятельности заложен в конструкции мозга [10]. В результате — самоусовершенствование в этих занятиях и... повышение способностей в данной области: работает положительная обратная связь, которая вызывает «генерацию» мастерства и новых идей.

Такой механизм развития (повышения) способностей нельзя считать чем-то искусственным, навязанным индивидууму извне. Когда проявляется талантливость человека, то все происходит по такой же схеме, разве что медленнее. Случайно испытав радость от занятия каким-либо делом, ребенок ищет повторения этого удовольствия. Возникает положительная обратная связь, которая и генерирует развитие склонностей и способностей именно в данной области науки или искусства. Этот случайный механизм формирования программы деятельности индивидуума более существен, чем его «конструкция», т. е. задатки, обусловленные генотипом.

Проводя аналогию с ЭВМ, можно сказать, что и в этом случае эффективность программы более важна для решения той или иной проблемы, чем индивидуальные особенности конструкции машины, разумеется, в пределах данного их класса.

Предложенная аргументация вполне согласуется с утверждением Рамон-и-Кахаля о том, что мотивация в творчестве имеет большее значение, чем интеллектуальные способности исследователя [9]. Легко видеть, что любые «мотивы достижения», вызывающие то «высокое напряжение, которое ведет к открытию», в конечном счете есть опосредствованное возбуждение центров удовольствия [10]. Это может совершенно не осознаваться. Например, можно получать удовлетворение, аскетически отказывая себе во всем ради поиска или реализации какой-то идеи.

Заинтересовавшихся гипнотическими методиками, к сожалению, ожидают значительные трудности, связанные с низкой природной гипнабельностью большинства людей. Путем использования гипноза «вручную» или существующих технических средств удается выбрать пригодных для работы лиц лишь из очень большого числа добровольцев [11]. А высокая гипнабельность у самого экспериментатора, занимающегося, например, поиском эвристик, — чересчур счастливое совпадение.

Высокий уровень самоанализа или характерный для творческих натур наплыв собственных мыслей делают малоэффективными обычные приемы внушения и самовнушения, которыми погружают в состояние гипноза или соответственно — самогипноза.

Внушение — это введение информации, воспринимаемой без верификации, т. е. без определения ее достоверности, критической ее оценки [12].

Таким образом, задача повышения эффективности гипнотизирования состоит в том, чтобы суметь вводить информацию,

минуя критическую оценку ее сознанием. Перспективны два направления разработки приборных методов гипнотизирования. Первое — маскировать внушаемую информацию индифферентной. Это метод так называемого «субсенсорного» воздействия [13]. В данном случае пользуются тем обстоятельством, что способность мозга извлекать сигнал из-под шума на уровне подсознания выше, чем на уровне сознания.

Второе направление — это заранее привести гипнотизируемого в состояние некритического восприятия действительности, например, в состояние, близкое к быстроволновому сну. Такой эффект дают приборные методы с самостимулированием через рецепторы по цепям обратной связи [14—16]. Любопытно отметить, что при этом могут возникать эйфория или очень неприятное ощущение, т. е. как-то возбуждаются центры удовольствия или «ада».

Центр удовольствия открыл в 1953 г. Джеймс Олдс в университете Мак-Хилла при исследовании электрического раздражения мозга крыс через вживленные электроды. Удручающее впечатление произвели остроумные опыты, когда крысы получили возможность включать электрическое «вознаграждение», нажимая лапой на педаль. Обученных голодных крыс выпускали в клетку, в одном углу которой находился корм, а в другом — педаль для «самораздражения». Не обращая внимания на пищу, крыса направлялась прямо к педали и предавалась непрерывной оргии самораздражения, надавливая на педаль по несколько тысяч раз в час в течение нескольких суток, пока не наступало физическое изнеможение. Опыты с крысами многих натолкнули на мысль, что человечество стоит на грани открытия электрического наркотика, более страшного по своим социальным последствиям, чем алкоголь, героин, марихуана и ЛСД вместе взятые. «Слег» Стругатских, «Галатея» Дашкиева и другие фантастические изобретения предостерегали, зывали к совести исследователей, заклинали остановиться. Но невозможно создать преграду любознательности и желанию помочь безнадежно больным. Р. Гис (1954), Х. Дельгадо (1960), М. Бишеп (1963), К. Сем-Джакобсон (1968) вживляли больным электроды в разные области, в том числе и в септальную, и доставляли больным наслаждения посредством электрического раздражения. В результате никаких отрицательных последствий! Более того, некоторых больных снабдили стимуляторами, которыми они сами могли раздражать центр удовольствия. И вот вместо электрических оргий, как у крыс в опытах Д. Олдса, — явный клинический успех: возвращение людей из психиатрических больниц к нормальной жизни в обществе.

Самораздражение центров удовольствия применялось для лечения шизофрении, фантомных болей, нарколепсии, эпилепсии, паркинсонизма и других тяжелых заболеваний, когда обычные методы оказывались исчерпанными. Более широкое использование методов электрического раздражения мозга сдерживается как

сложностью метода (многоканальные электроды с интегральными схемами для вживления, необходимость в специалистах и в условиях для стереотоксических операций), так и юридическими нормами, которые не разрешают применять возможности нейрохирургии для лечения, к примеру, наркомании [10].

Из наркологической практики известно, что психотерапевтические методы позволяют на некоторое время выработать рвотный рефлекс на предъявление алкоголя и снять абстинентный синдром (состояние алкогольного голодания). Однако значительные рецидивы алкоголизма обусловлены и тем, что пока нет безвредных фармакологических средств, возмещающих те возбуждения центра удовольствия, которые давал алкоголь. Надежную поддерживающую терапию излеченных алкоголиков и других наркоманов можно было бы обеспечить, имея некий эквивалент дельгадовской «септальной» кнопки для самостимулирования. Приборные средства для гипнотизирования и программирования эйфории у индивидуума, по-видимому, и явятся решением этой проблемы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. В. Карев, Л. С. Ильинская, А. П. Ильинский. Использование гипно- и аутоусуггестии для программирования мыслительной деятельности в научном творчестве и обучении. «Биокибернетика, моделирование биосистем, бионика». IV Украинская республиканская научная конференция, Киев, 1970.
2. А. В. Карев, Л. С. Ильинская, А. П. Ильинский. Некоторые способы программирования мыслительной деятельности в научном творчестве и обучении. Сб. «Проблемы бионики», вып. 8. Изд-во Харьковск. ун-та, 1972.
3. В. Л. Леви. Я и мы. М., «Молодая гвардия», 1969.
4. А. С. Ромен. Самовнушение и его влияние на организм человека. Алма-Ата, «Казахстан», 1970.
5. Ж. Адамар. Исследование психологии процесса изобретения в области математики. М., «Сов. радио», 1970.
6. Д. А. Близниченко. Ввод и закрепление информации в памяти человека во время естественного сна. Киев, «Наукова думка», 1966.
7. Х. Клейнзорге, Г. Клюбмисс. Техника релаксации. М., «Медицина», 1965.
8. О. К. Тихомиров. Эвристическое программирование и психология творческого мышления. Сб. «Проблемы научного творчества в современной психологии». М.-Л., «Наука», 1971.
9. М. Г. Ярошевский. О внешней и внутренней мотивации научного творчества. Там же.
10. Х. Дельгадо. Мозг и сознание. М., «Мир», 1971.
11. В. В. Петрусинский, Д. Г. Мирза. К вопросу об автоматизации методики гипнотического тестирования. Сб. «Проблемы обнаружения слабых реакций нервной системы. Труды Московского научно-исследовательского института психиатрии МЗ РСФСР», т. 55, 1968.
12. А. М. Свядощ. Неврозы и их лечение. М., «Медицина», 1971.
13. Б. И. Хачапуридзе. Об отражательной функции установки в связи с проблемой воздействия невоспринимаемых раздражителей; Тр. Тбилисск. ун-та, т. 124, 1966.
14. Г. Уолтер. Живой мозг. М., «Мир», 1966.
15. Л. И. Лебедева. О возможностях саморегулирования мозгом интенсивности родовой боли. Сб. «Боль и борьба с ней». М., «Медицина», 1966.
16. А. П. Ильинский, И. И. Кухтевич. Устройство для усыпления и гипноза. Авт. свид. № 160776 от 2. I. 1963. «Бюллетень изобретений», 1964, № 5.

# МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ И СУБМОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

*М. Ф. Бондаренко, Е. А. Соловьева*

Человек способен классифицировать части речи или части слов по некоторым признакам, т. е. решать задачи морфологической классификации. Нас интересуют математические модели такой способности абсолютно грамотного человека, выполняющего предложенную задачу классификации точно в соответствии с правилами грамматики русского языка [1, 2]. В данной работе рассмотрим задачу классификации глаголов на разряды по признаку формы (неопределенной или личной). На примере решения этой задачи продемонстрируем достоинства и недостатки предложенных ниже методов решения тех задач морфологической классификации, которые на основании одних только формальных признаков невозможно решить точно.

I. Решение задачи основывается на формальных признаках, за исключением случаев, когда это может привести к ошибкам. В таких случаях допускается минимально возможный словарь исключений, который дает возможность получить точное решение.

II. Решение задачи основывается только на формальных признаках, и потому оно получается с некоторой погрешностью.

Задачу можно также решать методом, представляющим собой комбинацию методов I и II.

При решении задачи классификации глаголов по признаку формы абсолютно грамотному человеку предъявляется глагол (например, из словаря русского языка [3]) в любой простой форме (одно слово). Испытуемый должен определить форму предложенного глагола. Необходимо математически описать такую психическую функцию человека.

Постановка задачи в общем виде представлена на рис. 1, где  $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  — множество входных сигналов;  $Y = \{y_1, \dots, y_n\}$  — множество выходных сигналов;  $A$  — преобразователь информации, классифицирующий глаголы по признаку формы (неопределенной или личной). Подав на вход  $B$  преобразователя информации  $A$  какое-либо входное слово  $x_i \in X$ , на выходе  $g$  получим это же слово, классифицированное по признаку формы, т. е. выходной сигнал  $y_i \in Y$ , после чего на вход можно подавать новое слово. Необходимо составить математическое описание для  $A$ . В данной статье приведены два таких математических описания в виде алгоритмов AI (рис. 2) и AII (рис. 3).

Неопределенная форма глагола (инфинитив) рассматривается как начальная, исходная форма для всей системы глагола [1]. Поэтому представляется важным решение задачи выделения



Рис. 1.

глаголов в данной форме из всей массы глагольных форм. Результаты психологических экспериментов, а также анализ парадигмы глагола показали, что на основании одних только формальных признаков невозможно точно решить поставленную задачу. При этом было установлено, что все глагольные формы можно подразделить на три типа:

а) глагольные формы, классифицирующиеся на основании формальных признаков;

б) глагольные формы, классифицирующиеся при условии известности их лексических значений;

в) глагольные формы, классифицирующиеся только при наличии контекста.

Разделение на типы проведено для глагольных форм при решении конкретной задачи. Несмотря на это, такое разделение сохраняется в общем виде и для других задач классификации, причем множества слов одного или двух каких-либо типов в некоторых случаях могут оказаться пустыми.

Глагольные формы типа а) имеют различные формальные признаки для различных разрядов, на которые эти глагольные формы классифицируются. К типу а) в данной задаче принадлежит большая часть глагольных форм. К типу б) относятся те глагольные формы, которые, несмотря на одинаковые формальные признаки, принадлежат к различным разрядам. Например, все глаголы в неопределенной форме оканчиваются на «ть», «ти» или «чь». В то же время некоторые глаголы в личной форме (повелительное наклонение второе лицо единственное число) оканчиваются точно так же, причем иных формальных различий все вышеперечисленные глаголы не имеют. Ясно, что классифицировать такие глаголы на основании одних формальных признаков невозможно.

Глаголы типа в) при отсутствии контекста можно отнести к различным разрядам. Например, глагол *расти* относится одновременно и к неопределенной форме, и к личной. Так как слова предъявляются человеку без контекста, то в случае глагольных форм типа в) такой двойкий ответ для данной задачи будем считать верным.

Человек в состоянии точно решить задачу, если ему известны лексические значения глаголов типа б) и в), причем для поставленной задачи классификации число таких глаголов значительно. Следовательно, при решении данной задачи на ЭЦВМ необходимо «ознакомить» машину с большим числом глаголов, что нецелесообразно. Поэтому для решения применим методы I и II, исключая такую необходимость.

Решение поставленной задачи методом I в виде блок-схемы алгоритма А1 показано на рис. 2. В множество входных сигналов  $X$  включены все глаголы русского языка, входящие в словарь [3], и все простые формы этих глаголов. Множество выходных сигналов  $Y$  — это множество  $X$ , классифицированное по признаку формы, т. е. выходной сигнал  $y_i$  — это входной сигнал  $x_i$  с до-

бавлением признака формы:  $\Pi_1$ , если глагол стоит в неопределенной форме;  $\Pi_2$  — если в личной;  $\Pi_1 \wedge \Pi_2$ , если без контекста глагол можно отнести и к неопределенной, и к личной формам.

Рассмотрим функционирование элементарных блоков алгоритма — распознавателей и операторов (общий принцип их действия описан в работе [4]). Распознаватели, входящие в состав алгоритма А1, выполняют проверку следующих условий:  $\Phi_1$  проверяет две последние буквы слова на «ся» или «сь»;  $\Phi_2$ ,  $\Phi_3$  и  $\Phi_4$  — те же буквы соответственно на «чь», «ти» и «ть»;  $\Phi_5$  — третью от конца букву слова на «з» или «с»; а  $\Phi_6$  — ту же букву на «й».  $\Phi_{ik}$  ( $k = 1, 5$ ) проверяет, оканчивается ли входное слово на одно из слов словаря  $I_k$ , а  $\Phi_{cl}$  ( $l = 1, 6$ ) — совпадает ли входное слово с одним из слов словаря  $S_l$ .

Операторы в алгоритме А1 выполняют следующие действия;  $U_1$  отбрасывает две последние буквы слова;  $I_{\Pi_1}$  заменяет слово, поданное на его вход, признаком  $\Pi_1$ ;  $I_{\Pi_2}$  — признаком  $\Pi_2$ , а  $I_{\Pi_1 \wedge \Pi_2}$  — признаком  $\Pi_1 \wedge \Pi_2$ . Каждая из цифр 1, 2, 3 на вы-

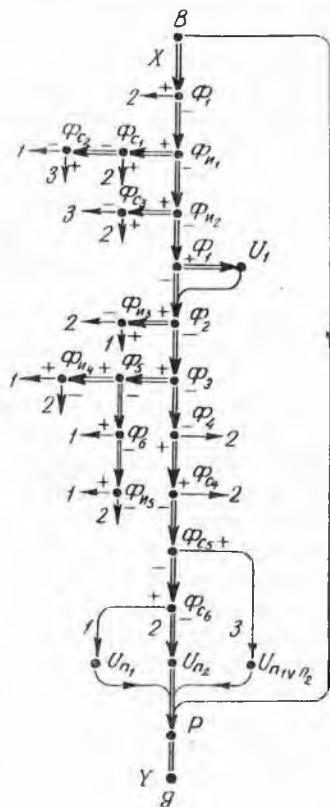


Рис. 2.

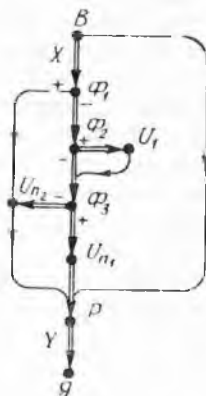


Рис. 3.

ходе любого блока означает, что этот выход должен быть соединен соответственно с оператором  $I_{\Pi_1}$ ,  $I_{\Pi_2}$ ,  $I_{\Pi_1 \wedge \Pi_2}$ .

Блок  $P$  выполняет одновременно функции оператора и блока памяти. Запоминая поданное на его вход слово, блок  $P$  приписывает к этому слову поданный через некоторое время признак. Затем полученный сигнал поступает на выход алгоритма, после чего блок освобождается, и на вход алгоритма можно подавать новое слово.

На рис. 3 показана блок-схема алгоритма АII, который является решением задачи по методу II. Входные сигналы АII аналогичны входным сигналам АI, но их количество для АII может неограниченно возрастать за счет добавления новых слов, не входящих в состав словаря [3]. В зависимости от того, какие слова добавятся, может несколько меняться погрешность алгоритма А II, но на самом деле эти изменения не будут особенно заметными. В то же время нет практической необходимости расширения множества входных слов новыми глаголами, так как это множество составляют все глаголы современного русского языка со своими формами. Поэтому для определенности ограничим множество входных сигналов X алгоритма А II, т. е. будем считать входные сигналы АI и АII абсолютными одинаковыми.

Выходные сигналы АII отличаются от выходных сигналов АI только тем, что при классификации глаголов к входным словам могут добавляться только признаки  $\Pi_1$  или  $\Pi_2$  (признак  $\Pi_1 \wedge \Pi_2$  исключается).

Функционирование всех элементарных блоков АII (кроме распознавателя  $\Phi_3$ ) ничем не отличается от работы этих же блоков в АI, описанных ранее; распознаватель  $\Phi_3$  проверяет две последние буквы слова на «чб», «ть» или «ти».

В зависимости от требований, предъявляемых к той или иной задаче, возможно применение алгоритма АI или АII. Когда необходимо точное решение, пользуются алгоритмом АI, если же требуется простота и большая скорость решения, — алгоритмом АII.

Предложенные алгоритмы могут оказаться полезными при решении других задач классификации, куда они войдут в виде составной части. Алгоритмы могут представить и самостоятельный интерес как математические модели одной из психических функций человека. Полученные алгоритмы реализованы на ЭЦВМ.

Решив поставленную задачу предложенными в начале статьи методами классификации, можно сделать некоторые выводы.

Решение задачи методом I следует считать целесообразным, если число слов словаря исключений значительно меньше количества входных слов. Например, в данной задаче входными могут являться все глаголы словаря русского языка, включающего 104 тысячи слов [3], со своими формами, а словарь исключений содержит всего около 50 слов. При решении задачи методом II необходимо стремиться к тому, чтобы погрешность решения была минимальной. В нашей задаче, решенной методом II, погрешность приблизительно равна 0,1%. В работе [5] математическая модель способности человека проверять правильность переноса слов, составленная методом II, также получена с небольшой погрешностью (менее 1%),

Выбор того или иного метода либо обоих методов одновременно зависит от конкретной задачи и результатов, которые необходимо получить. Метод II, например, обычно более прост, но всегда содержит некоторую погрешность. Когда необходимо абсолютно

точное решение, применяется метод I. Если же получение решения этим методом почему-то затруднительно или основным требованием является простота решения, то следует отдать предпочтение методу II. Метод II можно применять, если погрешность решения этим методом не превышает допустимую.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Грамматика русского языка, т. I. М., изд-во АН СССР, 1960.
2. Грамматика современного русского литературного языка. М., «Наука», 1970.
3. Орфографический словарь русского языка, изд. II-е. М., «Сов. энциклопедия», 1971.
4. Л. А. К а л у ж н и н. Об алгоритмизации математических задач. Сб. «Проблемы кибернетики», вып. 2. М., Физматгиз, 1959.
5. Е. А. С о л о в ь е в а. Математическое описание способности человека анализировать правильность переноса слов. Сб. «Проблемы бионики», вып. 8. Изд-во Харьковск. ун-та, 1972.

## РЕФЕРАТЫ

- УДК 62.506.2      **О структурной сложности и технической реализации формальных нейронов на магнитных токовых переключателях.** Потапов В. И., Миренков П. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 3—15.

Рассматриваются вопросы технической реализации монофункциональных и многофункциональных формальных нейронов. Анализируется общая конструктивная сложность следующих типов формальных нейронов: с запрещающими волокнами, с разрешающими, с объединяющимися и с комбинацией спонтанных и запрещающих волокон.

Рисунков 6. Библиографических ссылок 11.

- УДК 62.506.2      **Синтез минимизированных формальных нейронов на магнитных токовых переключателях.** Воронкова Л. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 15—22.

Рассматривается разработка алгоритмов синтеза минимизированных нейронов на основе магнитных токовых переключателей. Предложена более универсальная методика синтеза минимального по числу синапсов формального нейрона, значительно сокращающая процесс достижения конечной цели—выбора рабочего набора.

Рисунков 5. Библиографических ссылок 3.

- УДК 62.506.2      **Моделирование на ЭВМ процесса определения рода заданного слова.** Якименко Л. И. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 22—26.

Описана модель морфологической классификации имен существительных по роду. Род заданного слова определяется на основании формальных признаков в тех случаях, когда набор таких признаков является достаточным для решения задачи. С целью полной автоматизации процесса определения рода используемого словаря применена программная модель, практически реализованная на ЭВМ «Урал-4».

Рисунков 1. Библиографических ссылок 2.

- УДК 62.506.2      **Об одной математической модели процесса формирования и актуализации понятий.** Шапиро С. И., Шапиро А. И. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 26—33.

Предложена операторно-логическая модель процесса свертывания мыслительных структур при обучении математике. Введено понятие о логических координатах, исследована их связь с эвристиками. Описан регулярный метод формирования логических координат с помощью алгоритмов Ляпунова. Экспериментально обоснована гипотеза о центральном управлении в механизме функционирования логических координат при решении задач.

Таблиц 1. Рисунков 2. Библиографических ссылок 11.

УДК 62.506.2      **К вопросу о выборе физической модели системы поддержания равновесия человека.** Внуков В. А., Гуревич Р. А. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 33—38.

Рассмотрена статика механических моделей тела человека во фронтальной и сагиттальной плоскостях. Критерием статической устойчивости системы выбран максимальный угол наклона туловища относительно вертикальной оси, при котором система находится в равновесии. На основании этого критерия выбирается механическая модель.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 2.

УДК 62.506.2      **Нейроподобные элементы в режиме восстанавливающих органов.** Потапов В. И., Доценко М. Ф. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 38—49.

Рассматриваются математические модели трех типов нейроподобных элементов в режиме восстанавливающих органов. Выведены выражения для расчета вероятности безотказной работы резервированных систем с неадаптивными и адаптивными нейроподобными восстанавливающими органами, исследована эффективность нейроподобных элементов в режиме восстанавливающих органов. Это дает возможность на основании априорных данных о наиболее вероятной ситуации в процессе работы на входах восстанавливающего органа выбрать самую эффективную структуру и алгоритм адаптации нейроподобного восстанавливающего органа.

Рисунков 7. Библиографических ссылок 3.

УДК 62.506.2      **Алгебраическая природа структур формирующегося мышления.** Чудаков В. Н. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 49—57.

Рассмотрены алгебраические свойства структур мышления: обратимость, свойства групп и структур порядка. Доказаны теоремы об обратимости операций мышления, о необходимых и достаточных условиях процесса логического мышления, о групповых свойствах структур мышления. Описаны структуры мышления формального уровня.

Библиографических ссылок 11.

УДК 62.506.2      **Введение метрики в поле зрения.** Шабанов-Кушнарченко Ю. П., Шульгин И. В., Лопатченко Б. К. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 58—66.

Математически описаны закономерности преобразования физического пространства в субъективное поле зрения при монокулярном восприятии. Введение в поле зрения аксиоматическим путем линейного нормированного пространства позволило доказать существование отображения  $\Phi$ , переводящего исходную форму поля зрения в нормальную и обеспечивающего в ней евклидову метрику. Получены диаграммы, характеризующие вид преобразования  $\Phi^{-1}$ .

Рисунков 6. Библиографических ссылок 7.

УДК 62.506.2      **Об изоморфизме структур мышления нейронного и психологического (операционального) уровней.** Чудаков В. Н. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 66—73.

Для выявления изоморфизма нейронных и операциональных (психических) структур мышления применен аппарат алгебраических систем. Доказана теорема о соответствии алгебраических и логических структур. Дано понятие нейронных и операциональных структур мышления. Сформулированы аксиомы нейронных структур, соответствующих операциональным структурам конкретного и формального уровней мышления. Доказана теорема о групповых свойствах нейронных структур.

Библиографических ссылок 10.

УДК 62.506.2. **Математическая модель регулируемого подчеркивания контуров изображения.** Путятин Е. П., Сердюченко В. Я. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 74—82.

Предложена математическая модель краевого контраста зрения, исследованная в широком диапазоне изменения входных сигналов. Определена зависимость степени подчеркивания контура от соотношения яркостей изображения.

Таблиц 2. Рисунков 5. Библиографических ссылок 5.

УДК 62.506.2 **Теоретические предпосылки нормализации изображений.** Сообщение I. Путятин Е. П. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 82—89.

Сформулирована и доказана теорема о существовании эталонных изображений в случае нормализации аддитивных и мультипликативных преобразований носителя. Обоснованы необходимые и достаточные условия, которым должны удовлетворять нормализующие операторы.

Библиографических ссылок 5.

УДК 62.506.2 **Потребности и психическая деятельность.** Манешин В. С. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 89—93.

Установлена связь между потребностями и психической деятельностью, зависимость активности животных организмов от принципиально новых функций особым образом организованной материи. Обратное воздействие психики на потребности наиболее отчетливо проявляется у человека: его разумная деятельность выходит за рамки биологической замкнутости потребностей животного и приобретает многосторонний характер. Человек изменяет не только окружающую природу, свои потребности, но и самого себя. Без связи потребностей с психикой человеческая активность и труд как ее высшее проявление невозможны.

УДК 681.327.12(0888) **Конечные автоматы распознавания образов.** Прицкий А. М., Витенько И. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 93—99.

Рассмотрены читающие автоматы, в которых распознаваемые объекты кодируются с помощью слов одинаковой длины. Поставлена и решена задача минимизации распознающего автомата с заключительными состояниями. Изучена возможность применения конечных автоматов Мура для распознавания образов.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 2.

УДК 62.506.2 **К динамике системы поддержания равновесия человека.** Внуков В. А. Шабанов-Кушнаренко Ю. П. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 99—104.

Рассмотрена задача о поддержании равновесия многозвенной вращательной системы. На основании уравнений Лагранжа предложена модель системы, трансформирующаяся для случая поддержания равновесия. Чтобы решить линеаризованную двухзвенную модель, предложено дополнительное условие в виде закона изменения реакции опоры во времени.

Рисунков 1. Библиографических ссылок 1.

УДК 62.506.2 **Об одном способе экспериментального исследования слуха.** Еремин Г. С. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 104—109.

Предлагается переключающее устройство, позволяющее в целях уменьшения щелчков включения формировать звуковые сигналы с фронтами, совпадающими по форме с полупериодом синусоидальной волны.

Рисунков 4. Библиографических ссылок 6.

УДК 62.506.2

**К вопросу об определении точности и информативности функционирования электронных моделей сенсорной системы человека.** Тищенко В. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 109—113.

Для определения точности и информативности функционирования электронных моделей, отражающих свойства сенсорных систем, разработана методика контроля точности, времени реакции и количества информации в выходном сигнале по отношению к входному. Доказана целесообразность контроля этих параметров при определении идентичности работы моделей.

Библиографических ссылок 5.

УДК 681.327.12(0888) **Общие аспекты обучения распознаванию образов.** Пряницкий А. М. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 113—120.

Рассмотрена проблема обучения распознаванию объектов. Разработана общая методика обучения классификации объектов, представленных в виде двоичных и  $k$ -значных наборов. Проведено сравнение различных методов обучения, показаны преимущества и недостатки каждого из них.

Рисунков 2. Библиографических ссылок 2.

УДК 62.506.2

**Опτικο-электронная модель локальных детекторов зрительного анализатора.** Бугай Ю. П., Бахтигозин В. А., Червов В. Г. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 120—124.

Предложена опτικο-электронная модель детекторов локальных признаков зрительного анализатора, позволяющая воспроизводить рецептивные поля любой формы. Описана раздельная имитация зон возбуждения и торможения при помощи оптических масок с различной прозрачностью. Рассмотрена работа модели в режиме выделения границ и в режиме детектирования направленного движения объектов, предъявляемых на входе системы.

Таблиц 1. Рисунков 2. Библиографических ссылок 5.

УДК 62.506.2

**Устройство предварительной обработки изображений на входе цифровых вычислительных машин.** Нефедов Ю. И., Червов В. Г., Шатохин А. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 125—129.

Рассмотрено устройство первичной обработки изображений, предназначенное для уменьшения избыточности визуальной информации на входе ЦВМ за счет выделения и кодирования пространственных признаков изображений. Признаки выделены посредством телевизионной системы типа «бегущий луч». Система обеспечивает выделение контуров световых границ определенной конфигурации. С целью повышения быстродействия в устройстве предварительной обработки изображений используется вероятностный метод анализа признаков, основанный на предположении о том, что информативность признаков непосредственно связана с вероятностью их появления.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 12.

УДК 62.506.2

**О прецизионности телевизионных систем электронной развертки.** Нефедов Ю. И., Петрушко Р. Т., Шатохин А. В. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 130—135.

Для повышения температурной стабильности и уменьшения синфазных помех в блоках развертки ЭЛТ устройств ввода—вывода информации для ЦВМ применены мостовые схемы включения усилительных каскадов и отклоняющих катушек. Установлено, что линейность отклоняющего тока повышается за счет введения отрицательных обратных связей и использования

свойств генератора тока, а быстродействие развертки увеличивается из-за уменьшения индуктивности катушек и применения мощных высокочастотных транзисторов. Приведены практическая схема и характеристики оконечного каскада.

Рисунков 4. Библиографических ссылок 16.

УДК 62.506.2      **Один из методов определения параметров линейной модели обучаемости.** Дидиченко Н. П. Сб «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 135—137.

Описан метод определения параметров линейной модели обучаемости Р. Буша и Ф. Мостеллера по среднему числу серий ошибок длины  $r = 1$ ; 2. Библиографических ссылок 2.

УДК 62.506.2      **Оптимизация способа обработки эвристических изменений.** Илюнин О. К., Свиридов В. В., Плисс И. П. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 137—139.

Рассмотрен один из подходов при конструировании алгоритмов выбора оптимальных методов обработки статистических данных, минимизирующих суммарные потери, которые связаны с точностью обработки и объемом вычислений.

Библиографических ссылок 3.

УДК 62.506.2      **О некоторых способах программирования интеллектуальной деятельности.** Карев А. В., Ильинская Л. С., Ильинский А. П. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 139—144.

Рассмотрена методика программирования гипермнезии для извлечения эвристик из подсознания. Развитие творческих способностей гипотетически объясняется преимущественным влиянием гипноза на мотивационные аспекты деятельности человека.

Библиографических ссылок 16.

УДК 62.506.2      **Методы решения задач морфологической и субморфологической классификации.** Бондаренко М. Ф., Соловьева Е. А. Сб. «Проблемы бионики», вып. 10, 1973, стр. 145—148.

Предложены методы решения задач морфологической и субморфологической классификации. Описаны математические модели способности человека классифицировать глаголы по признаку формы (неопределенной или личной). Приведена сравнительная характеристика методов, перечислены рекомендации для их применения.

Рисунков 3. Библиографических ссылок 5.

## СОДЕРЖАНИЕ

В. И. Потапов, П. В. Миренков. О структурной сложности и технической реализации формальных нейронов на магнитных токовых переключателях . . . . .	3
Л. В. Воронкова. Синтез минимизированных формальных нейронов на магнитных токовых переключателях . . . . .	15
Л. И. Якименко. Моделирование на ЭВМ процесса определения рода заданного слова . . . . .	22
С. И. Шапиро, А. И. Шапиро. Об одной математической модели процесса формирования и актуализации понятий . . . . .	26
В. А. Внуков, Р. А. Гуревич. К вопросу о выборе физической модели системы поддержания равновесия человека . . . . .	33
В. И. Потапов, М. Ф. Доценко. Нейроноподобные элементы в режиме восстанавливающих органов . . . . .	38
В. Н. Чудаков. Алгебраическая природа структур формирующегося мышления . . . . .	49
Ю. П. Шабанов-Кушнаренок, И. В. Шутьгин, Б. К. Лопатченко. Введение метрики в поле зрения . . . . .	58
В. Н. Чудаков. Об изоморфизме структур мышления нейронного и психологического (операционального) уровней . . . . .	66
Е. П. Путятин, В. Я. Сердюченко. Математическая модель регулируемого подчеркивания контуров изображения . . . . .	74
Е. П. Путятин. Теоретические предпосылки нормализации изображений. Сообщение I . . . . .	82
В. С. Манешин. Потребности и психическая деятельность . . . . .	89
А. М. Пряницкий, И. В. Витенько. Конечные автоматы распознавания образов . . . . .	93
В. А. Внуков, Ю. П. Шабанов-Кушнаренок. К динамике системы поддержания равновесия человека . . . . .	99
Г. С. Еремин. Об одном способе экспериментального исследования слуха . . . . .	104
В. В. Тищенко. К вопросу об определении точности и информативности функционирования электронных моделей сенсорной системы человека . . . . .	109
А. М. Пряницкий. Общие аспекты обучения распознаванию образов . . . . .	113
Ю. П. Бугай, В. А. Бахтигозин, В. Г. Червов. Оптико-электронная модель локальных детекторов зрительного анализатора . . . . .	120
Ю. И. Нефедов, В. Г. Червов, А. В. Шатохин. Устройство предварительной обработки изображений на входе цифровых вычислительных машин . . . . .	125
Ю. И. Нефедов, Р. Т. Петрушко, А. В. Шатохин. О прецизионности телевизионных систем электронной развертки . . . . .	130
Н. П. Дидиченко. Один из методов определения параметров линейной модели обучаемости . . . . .	135

О. К. Илюнин, В. В. Свиридов, И. П. Плисс. Оптимизация способа обработки эвристических измерений . . . . .	137
А. В. Карев, Л. С. Ильинская, А. П. Ильинский. О некоторых способах программирования интеллектуальной деятельности	139
М. Ф. Бондаренко, Е. А. Соловьева. Методы решения задач морфологической и субморфологической классификации . . . . .	145
Рефераты . . . . .	150

---

Редактор Э. В. Ганичева  
Обложка художника И. Ф. Криворучко  
Техредактор Г. П. Александрова  
Корректор Г. С. Вайнберг

---

Сдано в набор 5/Х 1972 г. Подписано к печати 4/І 1973 г. БЦ 50005. Формат 60 × 90<sup>1/16</sup>. Объем 9,75 физ. печ. л., 9,75 усл. печ. л., 11,5 уч.-изд. л. Зак. 2-1755. Тираж 950. Цена 1 руб. 15 коп. Св. ТП 1973 г. поз. 226.

---

Харьковская книжная фабрика «Коммунист» Республиканского производственного объединения «Полиграфкнига» Государственного комитета Совета Министров Украинской ССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. Харьков, ул. Энгельса, 11.